

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

# **Návrh solárního Stirlingova motoru**

## **Design of Solar Stirling Engines**

Student:

Bc. Vít Lebeda

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Míka, CSc.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vít Lebeda**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Návrh solárního Stirlingova motoru**  
**Design of Solar Stirling Engines**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh implementace solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru do tepelného zásobování objektu.

Práce bude obsahovat:

1. Popis současného stavu teplovzdušných motorů a jejich solárních aplikací.
2. Popis současného stavu zásobování objektu tepelnou energií, včetně stanovení ročního průběhu spotřeby tepla.
3. Konkrétní návrh implementace solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru v reálném objektu.
4. Porovnání tohoto systému s kogenerační jednotkou na zemní plyn.
5. Posouzení realizovatelnosti této koncepce.
6. Technologické schéma zařízení.

Seznam doporučené odborné literatury:

Organ, J., A. Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine, Cambridge University Press 2010, ISBN-10: 0521131790.

Míka, J. Teplovzdušné motory - motory budoucnosti. Text vypracovaný v rámci projektu CZ.1.07/1.1.00/08.0010, Ostrava 2013.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Míka, CSc.**

Datum zadání: 31.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 14. 5. 2016

Vít Lebeda

podpis

Prohlašuji, že

jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).

souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 14. 5. 2016 .....

Vít Lebeda  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Vít Lebeda

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nádražní 169, 747 56 Dolní Životice

### **Poděkování**

Rád bych poděkoval doc. Ing. Jiřímu Míkovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce.

Děkuji také rodičům za celoživotní vedení k poznávání nových věcí a ochotu vždy vše vysvětlit. Poděkování patří také mé přítelkyni za podporu a motivaci.

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LEBEDA, V. *Návrh solárního Stirlingova motoru: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2016, 68 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Míka, CSc.

Práce se zabývá návrhem implementace solárního Stirlingova motoru. Jedná se o teplovzdušný motor s externím zdrojem tepla. Z tohoto důvodu je možné použít jakýkoli zdroj tepla. Patentován byl roku 1816. Práce popisuje princip, výhody, nevýhody, jednotlivé modifikace Stirlingova motoru, současný stav a již fungující solární aplikace Stirlingova motoru. Práce se dále zabývá vlastním návrhem implementace nízkoteplotního Stirlingova motoru na solární pohon, obsahuje popis současného stavu zásobování objektu energiemi, roční průběh spotřeby tepla objektu, porovnání konceptu s kogenerační jednotkou, posouzení realizovatelnosti konceptu a technologické schéma konceptu.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Stirlingův motor; Robert Stirling; princip; modifikace; návrh, implementace, kapalný dusík; solární aplikace; akumulace; nízkoteplotní (LTD) Stirlingův motor; Schmidtova teorie; vakuový trubicový kolektor; žlabové sběrače; generátor, čerpadlo; olej; baterie; akumulátor; ostrovní režim; NASA; MSI; modelářství.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

LEBEDA, V. *Design of Solar Stirling Engines: master thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2016, 68 p. Thesis head: doc. Ing. Jiří Míka, CSc.

The thesis deals with the implementation of solar Stirling engine. It is a hot engine with an external heat source. For this reason, it is possible to use any heat source. It was patented in 1816. The thesis describes the history, principles, advantages and disadvantages, various modifications of the Stirling engine, the current situation and already functioning solar Stirling engine applications. The thesis also deals with its own design for the implementation of low temperature Stirling engine solar powered. It contains a description of the current state of the supply of energy, the annual course of the heat consumption of the object, comparing the concept with a cogeneration unit, assessing the feasibility of the concept, the technological scheme of the concept.

**KEYWORDS:** Stirling engine; Robert Stirling; principle; modification; design, implementation, liquid nitrogen; solar applications; accumulation; low temperature (LTD) Stirling engine; Schmidt's theory; vacuum tube collector; trough collector; generator, pump; oil; battery; accumulator; Off-grid; NASA; MSI; model making.

## OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A ZKRATEK.....	9
1. ÚVOD .....	11
2. HISTORIE .....	12
3. PRINCIP STIRLINGOVA MOTORU .....	14
4. MODIFIKACE STIRLINGOVA MOTORU .....	16
4.1. Modifikace ALFA.....	17
4.2. Modifikace BETA .....	17
4.3. Modifikace GAMA .....	17
4.4. Pracovní plyny ve Stirlingovém motoru .....	18
5. STIRLINGŮV MOTOR NA KAPALNÝ DUSÍK .....	19
6. PŘEDNOSTI STIRLINGOVA MOTORU .....	20
7. NEGATIVA STIRLINGOVA MOTORU .....	21
8. SOLÁRNÍ APLIKACE STIRLINGOVA MOTORU .....	23
8.1. Model solární elektrárny se Stirlingovým motorem .....	27
9. STIRLINGŮV MOTOR V ČESKÉ REPUBLICE A VE SVĚTĚ .....	29
9.1. TEDOM .....	29
9.2. CLEANERGY.....	30
9.3. Dean Kamen .....	30
9.4. Honda .....	31
9.5. MSI.....	31
9.6. NASA.....	32
9.7. Modelářství .....	32
10. NÍZKOTEPLTNÍ STIRLINGŮV MOTOR NA SOLÁRNÍ POHON.....	33
10.1. Popis konceptu .....	34
10.2. Přehled rozměrů a teoretického výkonu.....	36
a) Výpočet objemů, tlaků a výkonu pro min. zdvih přemísťovacího pístu.....	36
b) Výpočet objemů, tlaků a výkonu pro max. zdvih přemísťovacího pístu .....	39
c) Zhodnocení výkonu při max. a min. zdvihu přemísťovacího pístu .....	41
10.3. Porovnání vakuového kolektoru a žlabového sběrače .....	42
a) Výpočet výkonu při použití Vakuového trubicového kolektoru .....	42
b) Výpočet výkonu při použití žlabového sběrače .....	43

c)	Zhodnocení výkonu při použití tohoto kolektoru a sběrače.....	44
10.4.	Konstrukce nízkoteplotního Stirlingova motoru .....	45
10.5.	Výpočet množství teponosného média .....	48
a)	Množství oleje pro max. zdvih přemísťovacího pístu .....	48
b)	Množství oleje pro min. zdvih přemísťovacího pístu .....	49
c)	Zhodnocení.....	49
10.6.	Základní specifikace nízkoteplotního Stirlingova motoru .....	50
11.	IMPLEMENTACE SOLÁRNÍHO NÍZKOTEPLTNÍHO SM .....	51
11.1.	Popis současného stavu zásobování objektu .....	51
a)	Zemní plyn.....	51
b)	Elektrická energie.....	52
11.2.	Stanovení ročního průběhu spotřeby tepla .....	53
11.3.	Návrh implementace solárního nízkoteplotního SM .....	55
10.1.1	Solární kolektory .....	57
10.1.2	Akumulační zásobník na horký olej .....	57
10.1.3	Akumulační zásobník na ochlazený olej .....	57
10.1.4	Čerpadla .....	57
10.1.5	Bateriové systémy.....	57
10.1.6	Alternátor.....	58
11.4.	Porovnání konceptu s kogenerační jednotkou.....	58
11.5.	Technologické schéma návrhu nízkoteplotního SM .....	60
11.5.1.	Varianta zásobování elektřinou .....	61
11.5.2.	Varianta zásobování teplem.....	61
12.	ZÁVĚR.....	62
13.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ .....	64
14.	SEZNAM PŘÍLOH .....	68



## SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A ZKRATEK

### Použité veličiny

symbol veličiny	veličina	značka jednotky
A	Redukovaný teplotní rozdíl	$[W^{-1} \cdot K \cdot m^2]$
I	Intenzita slunečního záření dopadajícího na plochu kolektoru	$[W \cdot m^{-2}]$
$P_{VN}$	Teoretický vnitřní výkon	[W]
Q	Teplo	[J]
$Q_i$	Spalné teplo	$[kWh \cdot m^3]$
T	Teplota okolního vzduchu	[K]
V	Okamžitý celkový objem	$[m^3]$
$a_1$	Lineární součinitel	$[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}]$
$a_2$	Nelineární součinitel	$[W \cdot K^{-2} \cdot m^{-2}]$
$a_c$	Teoretická vnitřní práce	[J]
$c_p$	Měrná tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
m	Hmotnost	[Kg]
n	Otáčky	[ot/s]
p	Tlak	[Pa]
r	Měrná plynová konstanta	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
t	Teplota	$[^{\circ}C]$
$\Delta t$	Rozdíl teplot	$[^{\circ}C]$
$\varphi$	Hodnota fázového posuvu	$[^{\circ}]$
$\mu$	Účinnostní charakteristika kolektoru	[-]
$\mu_k$	Účinnost kotle	[-]
$\mu_0$	Optická účinnost kolektoru	[-]
$\rho$	Hustota	$[Kg \cdot m^{-3}]$

## **Zkratky a indexy**

<b>Zkratka</b>	<b>Značí</b>
D	Škodlivý
E	Expanzní
K	Kompresní
P	Píst
R	Regenerátor
Z	Zdvihový
DE	Škodlivý expanzního
DK	Škodlivý kompresního
SM	Stirlingův motor
TV	Topná voda
ZE	Zdvihový expanzního
ZK	Zdvihový kompresního
AKU	Akumulační nádoba
KGJ	Kogenerační jednotka
TUV	Topná užitková doba
e	Okolní prostředí
s	Stagnační

# 1. ÚVOD

Poprvé jsem se o Stirlingovém motoru dověděl, když jsem se na internetu díval na videa a animace Wanklova motoru. Náhodou jsem narazil na video Stirlingova motoru. Motor mě na první pohled zaujal svou „jednoduchostí“. Začal jsem se o tento motor zajímat a studovat další materiály. Časem mě napadlo, že bych si mohl vyrobit vlastní model. Věděl jsem, že základní princip motoru je založen na diferenci teplot mezi dvěma částmi motoru - ohřívanou a ochlazovanou. Základní princip je tedy založen na roztažnosti plynu uvnitř motoru. Všechny motory a modely byly zahřívány plamenem.

Baví mě experimentování a zkoušení nových postupů. Přišlo mi zajímavé vyzkoušet model nezahřívát, ale chladit. Zdálo se mi úžasné, že může něco fungovat, když to budu pouze chladit. Hledal jsem vhodné chladivo. Po důkladné rekognoskaci jsem zjistil, že nejvhodnějším a nejdostupnějším je kapalný dusík, který má bod varu při  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Motor se mi podařilo vyrobit, ale nezvolil jsem vhodný poměr velikostí válců a motor nefungoval. Model je na obrázku 5.1, skutečný motor na obrázku 5.2. Na jiném modelu se mi tento pokus povedlo provést.

Stirlingův motor na kapalný dusík mě motivoval k tomu, abych vyrobil něco smysluplnějšího. Pro svůj další experiment jsem zvolil solární elektrárnu se Stirlingovým motorem. Koupil jsem velkou satelitní parabolu, nanesl jsem na ní zrcadlovou vrstvu a do ohniska nainstaloval Stirling. Při intenzivním slunečním záření elektrárna bez problémů rozsvítí několik diod. Tento koncept je použitelný spíše v rovníkových oblastech, kde je mnohem více slunečných dnů. V našich podmínkách by se musela parabola otáčet za Sluncem. Solární elektrárna se Stirlingovým motorem je na obrázcích 8.9 a 8.10.

Později mě napadlo, jak využít Stirlingův motor na solární pohon také v našich klimatických podmínkách. Rozhodl jsem se vytvořit návrh nízkoteplotního Stirlingova motoru na solární pohon. Cílem bylo navrhnout koncept tak, aby ho mohl vyrobit šikovný kutil ve vybavené domácí dílně. Při takovém předpokladu není potřeba velká přesnost výroby, je možné použít běžné materiály. Cílem bylo také vyrábět elektřinu jen tehdy, pokud bude odběr. Požadovaný elektrický výkon by měl být kolem  $3\text{ kW}_e$ .

Cílem diplomové práce je konkrétní návrh implementace solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru do reálného objektu, porovnat tento návrh s plynovou kogenerační jednotkou na zemní plyn a následně posoudit realizovatelnost této koncepce. Dalším cílem této práce je vytvořit technologické schéma zařízení a popsat současný stav zásobování objektu tepelnou energií, včetně stanovení ročního průběhu tepla.

## 2. HISTORIE



Obr. 2.1 Autor Stirlingova motoru Dr. Robert Stirling [16]

Už na začátku našeho letopočtu si alexandrijský Řek Heron, zvaný též Méchanikos všiml, že se plyny při ohřívání a ochlazování smršťují a roztahují. Dokonce i Leonardo Da Vinci se věnoval tomuto jevu.

V 17. století se objevilo první seriózní bádání. O tzv. Stirlingovém motoru jsou první zmínky z roku 1806. Svůj vynález si Sir Georg Cayley nenechal patentovat a tak je známý spíše jako průkopník avioniky.

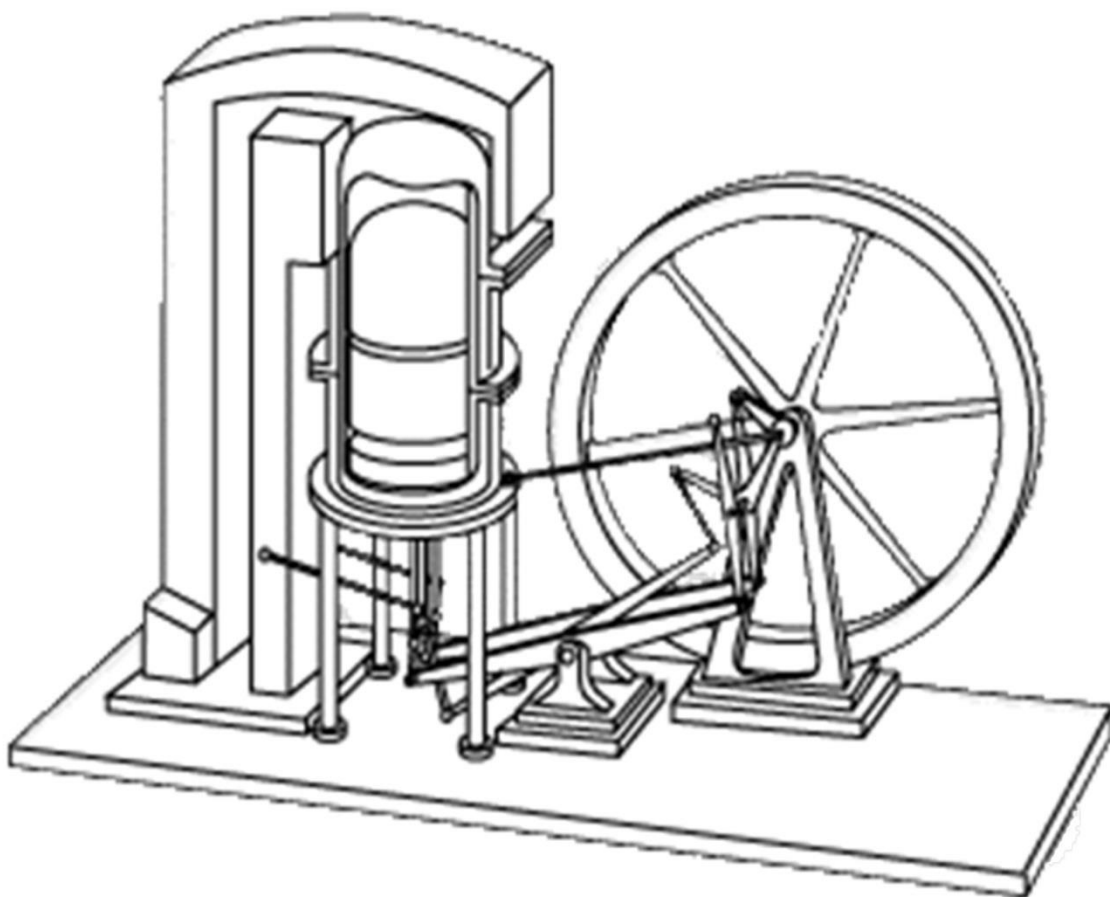
Dr. Robert Stirling byl technicky založený skotský pastor a lékař. Dnes se často označují teplovzdušné motory právě jeho jménem. Mezi jeho největší přínosy tomuto odvětví patří vynalezení regenerátoru, tento prvek výrazně zvyšuje účinnost celého cyklu. Regenerátor si nechal patentovat roku 1816. Tento typ motoru údajně vymyslel, protože chtěl zamezit velkému počtu úmrtí při výbuchu parních kotlů, tento systém nepotřebuje žádnou tlakovou nádobu, což z něj dělá výrazně bezpečnější stroj.

Motor měl od samého počátku smůlu, ve stejné době přišel se svým lehkým motorem vývojář Karl Benz. Teprve vyvíjející se Stirlingův motor se s ním nemohl rovnat. V roce 1843 předělal Robert Stirling parní stroj na vlastní systém. Při stejném výkonu 27 kW spotřeboval motor méně paliva a nebyl tak hlučný. Po půl roce provozu praskl ohřívavý válec. Tento problém se projevil opakovaně, proto motor přepracoval opět na parní pohon. Cyklus pracuje s vysokými teplotami a v polovině 19. století nebyly k dispozici dostatečně odolné materiály.

Významným člověkem v této oblasti byl také John Ericsson, ten si pohrával s myšlenkou spojení Stirlingova motoru a solární energie.

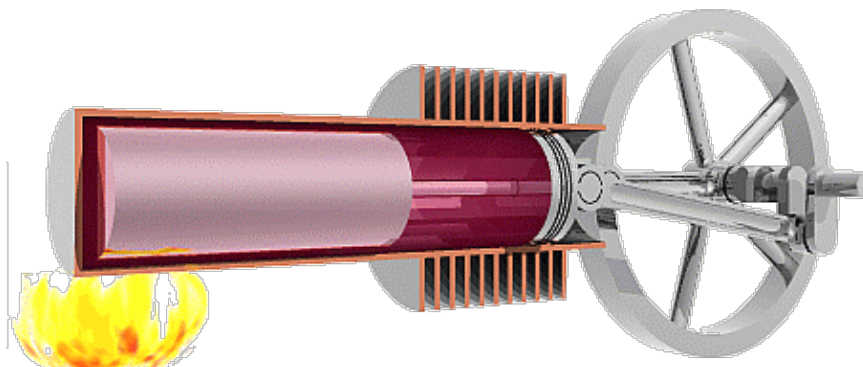
Přelom 19. a 20. století byl pro teplovzdušné motory obdobím největší slávy. V 30. a 40. letech 20. století se intenzivně Stirlingovým motorem zabývala společnost Philips. Firma potřebovala tichý kompaktní zdroj energie pro své mobilní vysílací stanice. Po druhé světové válce začala společnost uvažovat o implementaci svého vývoje v dopravě. Nejprve od společnosti Philips koupily patent GM a MAN, později také United Stirling. Roku 1973 koupila výhradní licenci na Stirlingové motory společnost Ford.

Pro svůj velmi tichý chod byl Stirlingův motor během studené války vyvíjen pro ponorky.



Obr. 2.2 Návrh Roberta Stirlinga [17]

### 3. PRINCIP STIRLINGOVA MOTORU



Obr. 3.1 Stirlingův motor [18]

Stirlingův motor je teplovzdušný motor s externím zdrojem tepla. Mezi takové zdroje můžeme zařadit například geotermální teplo, sluneční energii, uhlí, zemní plyn, biomasu nebo teplo vzniklé rozpadem radioaktivního materiálu. Tento motor funguje na bázi roztažnosti plynu. Když je médium ohříváno, svůj objem zvětšuje, pokud se ochlazuje, dochází k smršťování. Jednoduchý příklad tohoto jevu můžeme vidět, pokud dáme na hrdlo sklenice pružnou blánu a plyn ve sklenici začneme ochlazovat z okolní teploty na nižší teplotu. Blána se začne protahovat dovnitř sklenice vlivem ochlazení plynu, jak je znázorněno na obrázku 3.2. Pokud bychom začali vzduch uvnitř sklenice zahřívát, vzduch začne svůj objem zvětšovat a blána se začne natahovat nad okraj sklenice, jak je znázorněno na obrázku 3.3.



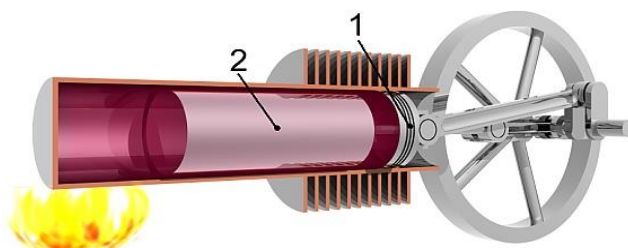
Obr. 3.2 Ochlazovaná sklenice [19]



Obr. 3.3 Ohřívaná sklenice [20]

Stirlingův motor je složen vždy ze dvou pístů a dvou nebo jednoho válce záleží, o jakou modifikaci jde. Stirlingův motor se dělí na tři modifikace - alfa, beta a gama. Na modifikaci beta se princip vysvětluje nejlépe.

Modifikace beta se skládá ze dvou pístů, jedná se o přemísťovací a pracovní píst a z jednoho válce. Na jedné straně dochází k ohřívání a na druhé k ochlazení válce. Delší píst s vůlí mezi válcem je označován jako přemísťovací píst. Kratší a utěsněný píst je označován jako pracovní. Oba písty jsou pevně spojeny klikovým mechanismem. Tento mechanismus zajišťuje vzájemné zpoždění pístů o  $\frac{1}{4}$  otáčky. Celý motor musí být dokonale utěsněn, jinak by docházelo k úniku média z pracovního prostoru. Dále se skládá ze setrvačníku, ten zajišťuje plynulost chodu motoru a hlavně pomáhá překonat tzv. mrtvý bod.



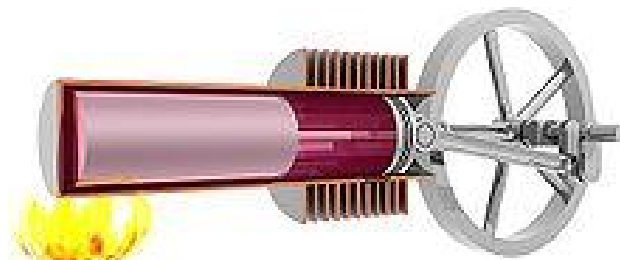
Obr. 3.4 Zahřívání média [21]

Píst č. 2 (přemísťovací) přesunul médium do ohřívané části válce. Vzduch se zde ohřívá a rozpíná se, dochází k zvětšování tlaku a tím k přemístování pístu č. 1 (pracovní) k setrvačníku. Tento píst uvádí do chodu setrvačnick a motor se roztáčí.



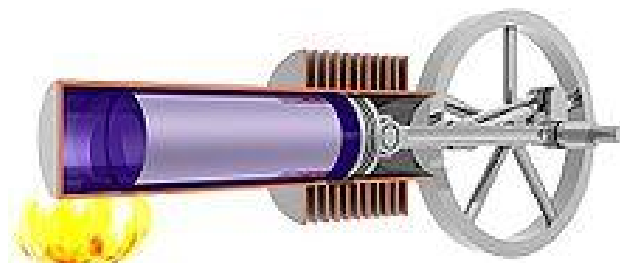
Obr. 3.5 Horké médium [22]

Horké médium zvětšilo objem a došlo k přemístění pracovního pístu do nejmenší vzdálenosti od setrvačnicku. Otáčením setrvačnicku dochází k pohybu přemísťovacího pístu a tím přemístování média do ochlazované části válce.



Obr. 3.6 Ochlazované médium [23]

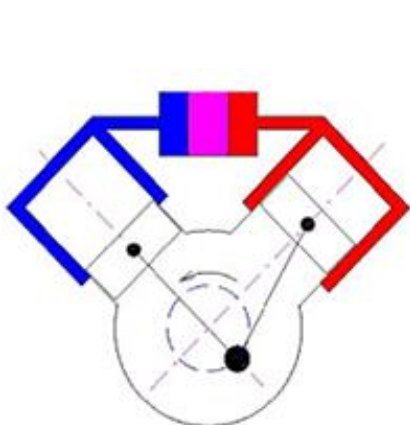
Většina média je v ochlazované části válce, plyn se zde ochlazuje a smršťuje.



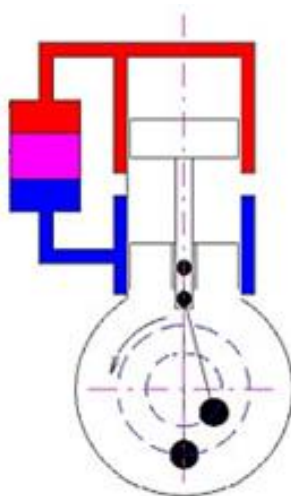
Obr. 3.7 Ochlazené médium [24]

Plyn se smrští a snížil svůj tlak. Pracovní píst je v největší vzdálenosti od setrvačnicku. Médium se začíná přemísťovat do ohřívané části válce vlivem pohybu přemísťovacího pístu, tady se opět zahřívá, dochází k přemístování pracovního pístu k setrvačnicku. Oběh se tak opakuje.

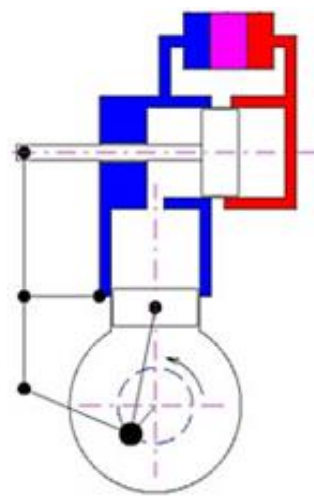
#### 4. MODIFIKACE STIRLINGOVA MOTORU



Obr. 4.1 Stirlingův motor  
typu alfa [25]



Obr. 4.2 Stirlingův motor  
typu beta [26]



Obr. 4.3 Stirlingův motor  
typu gama [27]

Modře je znázorněn chlazený válec, červeně je znázorněn ohřívaný válec. Fialová představuje tzv. regenerátor, dá se říct také ekonomizér. Tato část motoru výrazně zvyšuje jeho účinnost. Vyrábí se z kovu s vysokou tepelnou vodivostí. U kutilsky vyráběných motorů to jsou obvykle ocelové, měděné případně niklové špony. Materiál se vkládá do prostoru spojující ohřívanou a ochlazovanou část motoru. Regenerátor zajišťuje zmírnění plýtvání teplem. Ohřáté médium se přemístí do ochlazované části motoru, část tepla předá regenerátoru a dochladí se. Když je médium přemísťováno zpět do ohřívané části, v regenerátoru získá zpět předané teplo a dohřeje se. Je tak zajištěno efektivnější nakládání s teplem.

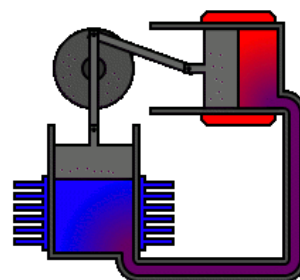


Obr. 4.4 Moderní regenerátor [28]



#### 4.1. Modifikace ALFA

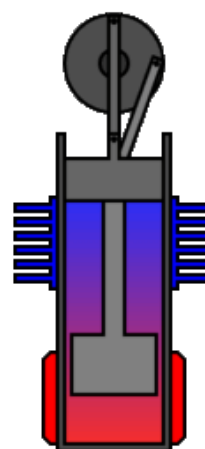
Jeden válec je ohříváný, druhý chlazený. Nevýhodou je, že se musí těsnit oba válce, k chodu potřebuje velký rozdíl teplot. Tato modifikace se v praxi používá nejvíce. Pro kutily je zajímavá tím, že je možné postavit ji ze spalovacích motorů do V.



Obr. 4.5 Modifikace alfa [29]

#### 4.2. Modifikace BETA

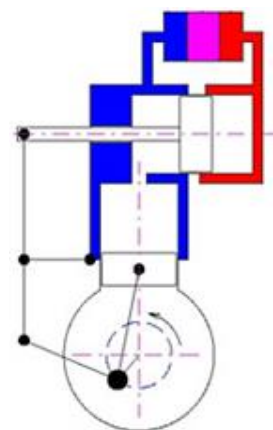
Přemísťovací i pracovní píst jsou v jednom válci. Část dále od klikového mechanismu je ohřívána. Část blíže ke klikovému mechanismu se chladí. Musí se těsnit pracovní píst a ojnice přemísťovacího pístu uvnitř pracovního pístu.



Obr. 4.6 Modifikace beta [30]

#### 4.3. Modifikace GAMA

Principem je stejná jako modifikace beta. Oba písty jsou ale ve svém válci. Část expanzního válce je zahřívána, druhá část se chladí. Ochlazován je také pracovní válec. Tato modifikace je nejsnazší k sestrojení.



Obr. 4.7 Modifikace gama [31]

#### 4.4. Pracovní plyny ve Stirlingovém motoru

Stirlingovy motory, jak je známe dnes, jsou úplně jiné, než ty na začátku. Nejprve se jako médium používal vzduch. S postupem vývoje ve všech odvětvích se zjistilo, že některé plyny mají lepší termodinamické vlastnosti než jiné. Nejlepší vlastnosti mají helium nebo vodík. Dnešní motory nejsou atmosférické jako ty první, ale používá se přetlak 10 MPa ale také 20 MPa. Tyto parametry umožňují dosáhnout účinnost Stirlingova motoru údajně až 55 %.

Jak bylo zmíněno výše, média mají různé termodinamické vlastnosti:

1. tepelná vodivost média – rychlost šíření tepla v objemu plynu (z teplejšího do chladnějšího). Tepelná vodivost se projeví zejména při vysokých otáčkách motoru. Celý cyklus ohřátí a ochlazení musí proběhnout velmi rychle. Tepelná vodivost média je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti ( $\lambda$ ).

2. měrná tepelná kapacita média – množství tepla potřebného k ohřátí 1 kg plynu o 1 K. U teplovzdušných motorů je vhodné, když malé množství přivedené energie způsobí velkou změnu teploty a tím i tlaku v pracovním plynu.

3. viskozita média – vnitřní tření média, určuje ztráty cyklu vznikající vlivem proudění pracovního plynu uvnitř motoru.

4. velikost molekuly média – je nežádoucí, aby pracovní plyn uzavřen uvnitř motoru unikl ven. U plynu s velmi malými molekulami tento problém nastává.

5. molární hmotnost média (popř. hustota média) – kolik plynu se nachází uvnitř motoru a účastní se pracovního cyklu. Tato veličina je velmi závislá na tlaku.

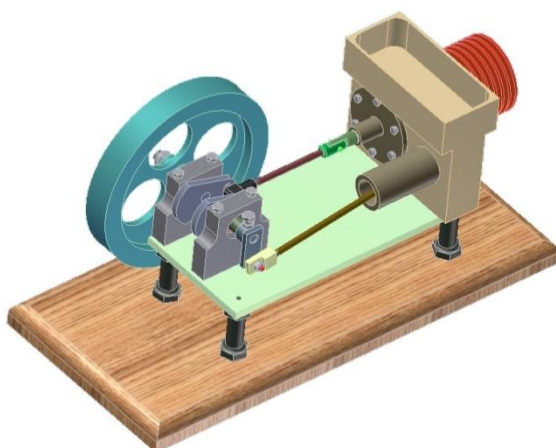
6. chemická reaktivita média – ovlivňuje životnost motoru, případně bezpečnost jeho chodu.

V praxi se obvykle používají tyto tři plyny: vzduch (popř. čistý dusík), helium a vodík.

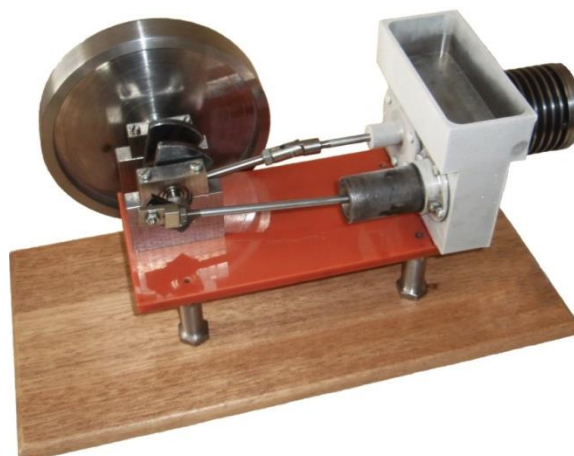
	Vodík (H <sub>2</sub> )	Helium (He)	Vzduch
Tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0,181	0,151	0,026
Měrná tepelná kapacita c <sub>p</sub> [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	14 310	52 000	1 003
Měrná tepelná kapacita c <sub>v</sub> [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	10 180	3 120	719
Měrná tepelná kapacita [J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	28,8	20,8	29,1
Hustota ρ[kg.m <sup>-3</sup> ]	0,09	0,18	1,28
Viskozita ν[Pa.s <sup>-1</sup> ]	9,13 × 10 <sup>-6</sup>	1,98 × 10 <sup>-5</sup>	1,98 × 10 <sup>-5</sup>

Tab. 4.1 Přehled vlastností médií [15]

## 5. STIRLINGŮV MOTOR NA KAPALNÝ DUSÍK



Obr. 5.1 Model SM na kapalný dusík



Obr. 5.2 Skutečný SM s dusíkem v nádobce

Stirlingův motor poháněný kapalným dusíkem jsem začal vyrábět na střední škole. Tento koncept mě napadl, když jsem viděl přetaktování procesoru počítače chlazený kapalným dusíkem. Přišlo mi fascinující vyrobit něco, co budu jen chladit a ono to bude konat práci. Čekal jsem, že už měl někdo stejný nápad přede mnou. Hledal jsem tedy bližší informace na českém internetu, žádné informace jsem nenašel ani po zadávání klíčových slov v jiných jazycích. Lákalo mě postavit model ještě více.

Nebylo snadné pustit se do výroby. Nevěděl jsem, jak vypočítat rozměry motoru nebo jaké jsou zásady pro konstrukci. Po dlouhém hledání jsem našel výkresy, které se mi zamlouvaly, byly ve špatném stavu. Překreslil jsem je a upravil pro realizaci s kapalným dusíkem. Vytvořil jsem také model v programu Autodesk Inventor, ten je obrázku 5.1. „Model SM na kapalný dusík“.

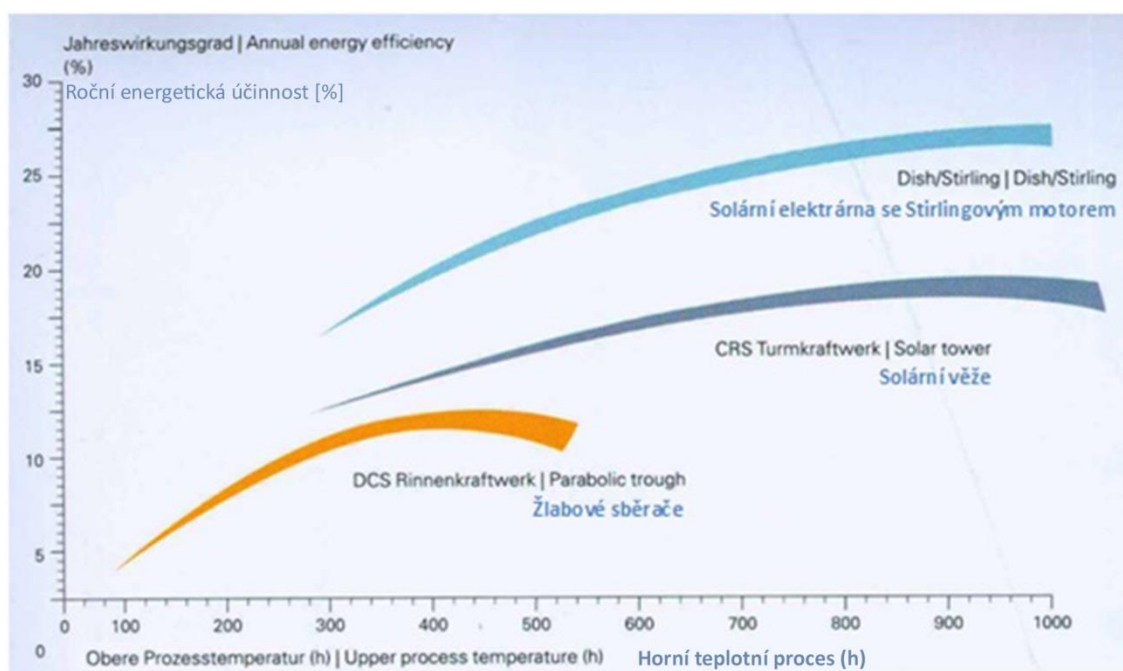
Konceptu na výkresech stačí teplo z kostky suchého lihu, rozdíl teplot přibližně 200 °C. Pokud je teplota okolního vzduchu cca 20 °C a teplota kapalného dusíku -196 °C, rozdíl teplot by měl být dostatečný. Problém nastal s extrémně nízkou teplotou kapalného dusíku. Všechny problémy jako izolace jednotlivých částí motoru, smršťování materiálů, mazání kluzných částí, atd. jsem vyřešil konstrukčně nebo použitím teflonu a dalších speciálních materiálů. Výsledek práce je na obrázku 5.2. „Skutečný SM s dusíkem v nádobce“

Z důvodu velkého tření v celém systému vlivem amatérské výroby se motor nepodařilo rozběhnout.

## 6. PŘEDNOSTI STIRLINGOVA MOTORU

Stirlingův motor mě zaujal zejména těmito přednostmi:

Do Stirlingova motoru se přivádí teplo externě, tímto není odkázán pouze na spalování čistých plyných nebo kapalných paliv, jako motory s vnitřním spalováním. Využije tedy jakýkoli zdroj tepla. Dokáže využít: odpadní teplo, geotermální teplo, solární energii, fosilní paliva, biomasu, rozpad radioaktivních materiálu. Externím spalováním se zamezí přímému působení spalin na píst, toto je velmi užitečné při spalování biomasy. Stirlingův motor má velmi klidný a tichý chod. Na rozdíl od konvenčních motorů má méně pohybujících se částí a také výrazně jednodušší konstrukci, díky tomu má vyšší životnost a je téměř bezporuchový. Z pohledu spalovacích motorů nemá žádné ventily a z pohledu parního stroje ho není nutné přehřívat. Vzhledem k externímu spalování je možné dosáhnout dokonalejšího a efektivnějšího využití paliva, což mimo jiné způsobuje velmi nízké emise. Stirlingův motor je unikátní tím, že jako jediný pístový stroj dokáže přeměnit energii ze slunečního záření přímo na mechanickou, tu následně na elektrickou. Solární elektrárna se Stirlingovým motorem dokáže přeměnit solární energii na elektrickou účinněji než jakýkoli doposud známý solární systém.



Obr. 6.1 Přehled účinností podobných solárních tepelných aplikací [32]

## 7. NEGATIVA STIRLINGOVA MOTORU

Tak jako každý mechanismus má i Stirlingův motor svá omezení, nevýhody a úskalí. Není to zázračný stroj, jak se po přečtení předchozího textu může zdát.

Mezi největší negativa můžeme zařadit:

Trvale vysoká teplota ohřívání části motoru. Dříve to byl problém z důvodu absence kvalitních žáruvzdorných materiálů. Dnes už jsou na trhu materiály, které bez problému snášejí vysoké teploty a také velké rozdíly teplot. Ze začátku byly tyto odolné materiály velmi drahé, ale postupem vývoje se daří jejich cenu snižovat.

Velkým problémem moderních Stirlingových motorů je také vysoký tlak plynu v motoru. Pro dosažení vysoké účinnosti je vhodné mít uvnitř motoru co „nejvíce“ plynu. Tlak plynu v moderních systémech dosahuje 10 MPa, ale také 20 MPa. Ve srovnání s pístovým spalovacím motorem má Stirlingův motor menší výkon na jednotku hmotnosti.

Velmi obtížné je také těsnění motoru. Je nutné těsnit systém, ve kterém je vysoký tlak a zároveň potřebujeme zajistit, co nejnižší tření.

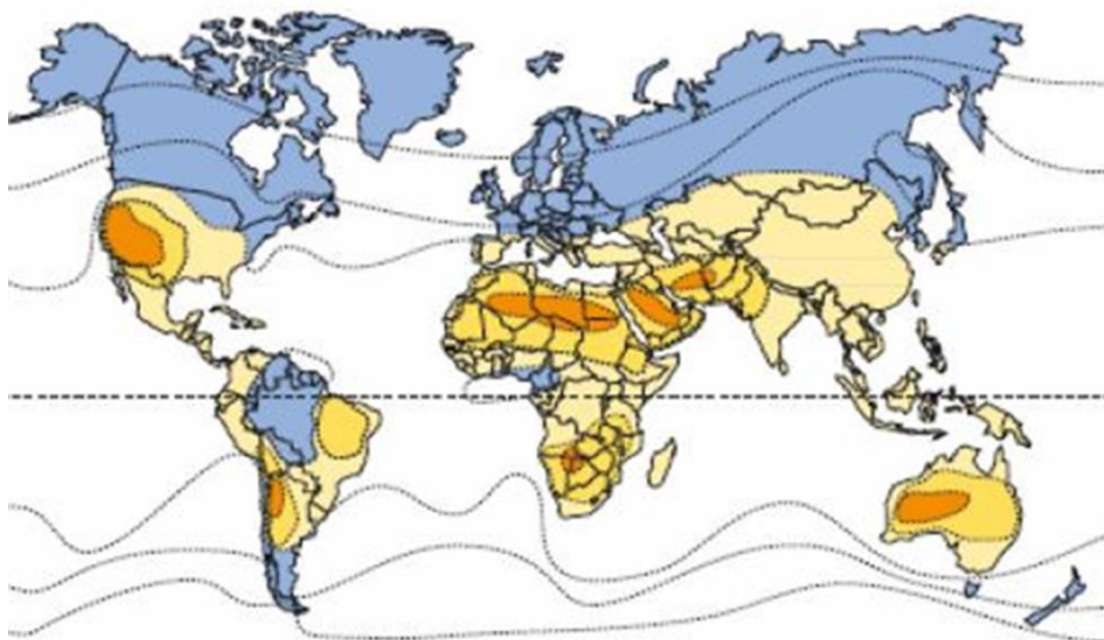
Dříve bylo obtížné regulovat výkon motoru. Dnešní moderní stroje řeší tento problém pomocí externího výměníku. V případě potřeby snížení výkonu dojde k přepuštění části pracovního média do tohoto výměníku, v systému klesne tlak a následně výkon motoru. Pokud je potřeba výkon opět zvýšit, médium se přepustí zpět do pracovního prostoru motoru, zvýší se tlak a výkon stoupne. Tímto způsobem je dosaženo rychlejší regulace než u pístových spalovacích motorů.

Kvalitní materiály, vysoký tlak a doplňky jako je regulace výkonu, cenu celého motoru prodražují. Výkonnostně srovnatelný Stirlingův motor stojí 2 - 3 krát více než běžný pístový spalovací motor. Tento cenový rozdíl je způsoben také tím, že se Stirlingův motor vyrábí pouze v malých sériích a do spalovacího motoru bylo v průběhu desítek let vývoje investováno mnoho prostředků.

Z výše uvedených důvodů je nutné pečlivě zvážit, kam tento systém implementovat. Nabízí se aplikace, kde je komplikované použít jiné motory nebo tam, kde je aplikace Stirlingova motoru provozně ekonomicky výhodnější.

Příklady implementace Stirlingova motoru se zajímavou návratností:

- Transformace solární energie na elektrickou na územích s intenzitou slunečního záření nad  $2\,000\text{ kWh/m}^2/\text{rok}^{-1}$ . Tyto oblasti jsou znázorněny na obrázku 7.1.
- Využívání plynů s nízkou výhřevností nebo těžce spalitelných plynů v pístových spalovacích motorech k výrobě elektřiny.



Vhodnost lokalit pro solární a tepelné systémy

■ Vynikající 
 ■ Vhodné 
 ■ Dostačující 
 ■ Nevhodné

Obr. 7.1 Vhodnost světových lokalit pro solární a tepelné systémy [33]

## 8. SOLÁRNÍ APLIKACE STIRLINGOVA MOTORU

V USA ve státě Arizona bylo postaveno první zkušební silo elektráren se Stirlingovým motorem (obr. 8.1). Každá jednotka má výkon  $25 \text{ kW}_e$ , elektrárna se skládá z 60 jednotek. Celkově má tedy výkon  $1,5 \text{ MW}_e$ .

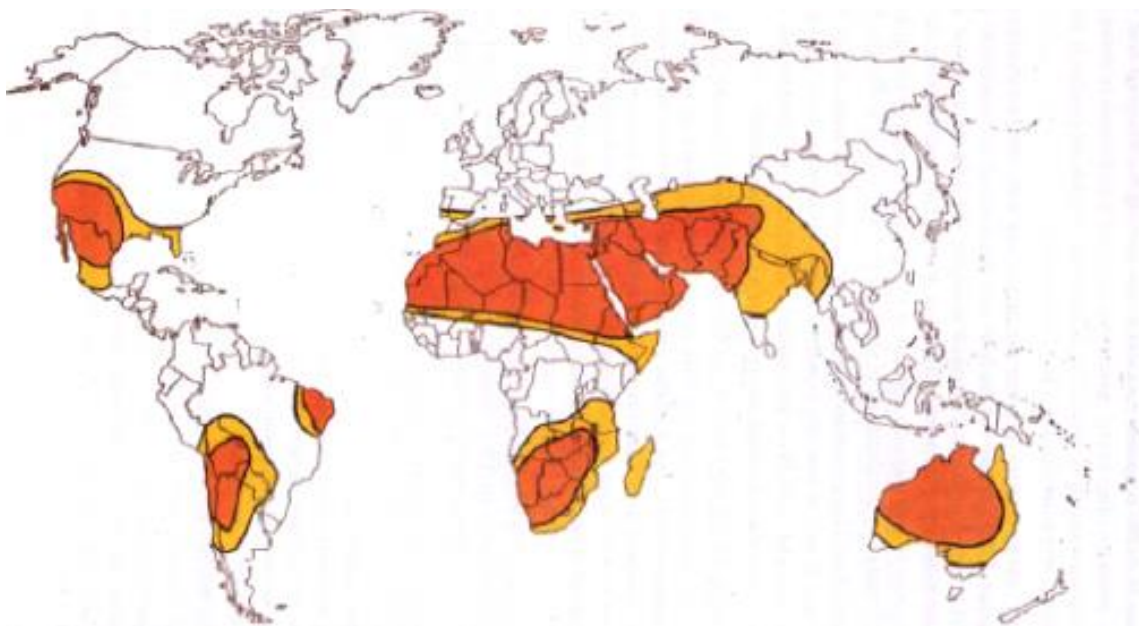


Obr. 8.1 Silo elektráren o výkonu  $1,5 \text{ MW}_e$  [34]

Podle realizátora se jedná o první zkušební projekt. Podle plánu by měly vyrůst další dvě sila v Kalifornii. Jedno by mělo mít výkon  $900 \text{ MW}_e$ , postaveno má být v San Diegu. Druhé by mělo mít výkon  $850 \text{ MW}_e$  a má se nacházet v Edisonu. Sila měla být postavena už během roku 2010, s ohledem na nedostatek financí a byrokratických problémů byl projekt odložen. Každé ze sil by mělo zabrat plochu cca  $3\,400 \text{ ha}$ . Silo se bude skládat z jednotek o výkonu  $25 \text{ kW}_e$ , stejně jako zkušební silo v Kalifornii. Menší silo se tedy bude skládat z  $34\,000$  jednotek ( $850 \text{ MW}_e$ ) a větší z  $36\,000$  jednotek ( $900 \text{ MW}_e$ ). Jednotka se nazývá SunCatcher. Pracovní plyn jednotky je vodík. Zrcadlovou plochu tvoří 38 zakřivených zrcadel. Zrcadla mají podobný tvar jako kapoty automobilu, polotovary se tedy vyrábí na stejných lisech, aby se docílilo zlevnění výroby. SunCatcher drží světový rekord v účinnosti přeměny solární energie na elektrickou, tu dokáže transformovat s účinností  $31,25 \%$ .

Silo elektráren by mělo stát v poušti v jižní Kalifornii. V této oblasti je největší intenzita slunečního záření v USA, viz obrázek 8.2, na tomto obrázku jsou znázorněny také další vhodné lokality pro implementaci solárních systémů. V současné době je výrobní cena technologie SunCatcher velmi vysoká. Při zavedení sériové výroby se očekává výrazné snížení ceny a tím zlepšení dostupnosti technologie i pro jiné oblasti.





Obr. 8.2 Nejvhodnější lokality pro implementaci solárních systémů [35]

Silo elektráren v jižní Kalifornii a také již stojící silo elektráren v Arizoně, je tvořeno z jednotek SunCatcher druhé generace. Zrcadla jsou tvořena ze 40 kusů, odrazová část SunCatcheru první generace byla tvořena z 80 částí. Zrcadla již nejsou skládaná do obdélníku jako u první generace, ale do kruhu. SunCatcher tak má jednodušší konstrukci. Druhá generace má o 60 % méně mechanických částí, což vedlo k výrazné úspoře použitých materiálů a snížení výrobní ceny této technologie. Podle předpokladu by se mělo až 90 % součástek vyrábět v USA.



Obr. 8.3 Silo elektráren se SM [36]



Obr. 8.4 Silo elektráren se SM [37]

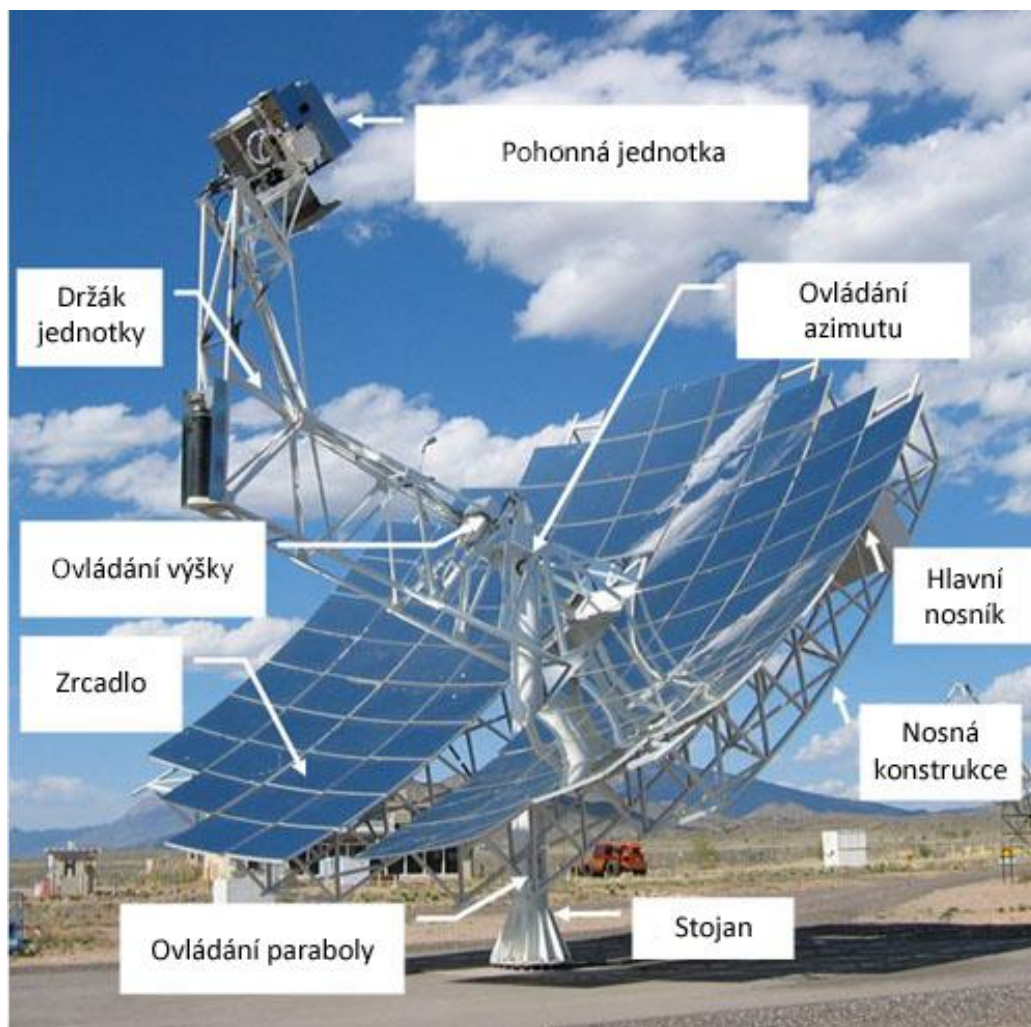




Obr. 8.5 SunCatcher první generace [38]



Obr. 8.6 SunCatcher druhé generace [39]



Obr. 8.7 Popis technologie SunCatcher [40]



Obr. 8.8 Popis jednotky technologie SunCatcher [41]



## 8.1. Model solární elektrárny se Stirlingovým motorem



Obr. 8.9 Čelní pohled na model solární elektrárny se Stirlingovým motorem

Solární elektrárnu se Stirlingovým motorem jsem začal stavět po Stirlingovém motoru na kapalný dusík. Chtěl jsem vyrobit něco užitečnějšího, co by mohlo být využito také v praxi.

Tento koncept je velmi podobný solární elektrárně diskový sběrač. Sluneční paprsky dopadající na parabolické zrcadlo jsou soustředěny do ohniska, ve kterém je umístěn Stirlingův motor. Pro zajištění využití jednotky během celého dne se parabola natáčí za Sluncem.

Pro tento pokus jsem chtěl použít velké parabolické zrcadlo, z důvodu jeho největší odrazivosti. Odhadl jsem, že by byla vhodná parabola o průměru cca 1 metr.

Zrcadlo pro mé účely se mi nedařilo najít. V ČR jsem našel pouze zrcadlo pro hvězdářské účely o průměru 600 mm. Pro mou solární elektrárnu by zřejmě stačilo, ale cena 140 000 Kč nebyla akceptovatelná. Navíc jsem takovou přesnost ani kvalitu nepotřeboval. V USA se mi podařilo najít parabolické zrcadlo o průměru 890 mm za přijatelnou cenu, ale cena dopravy celkovou cenu nepříjemně zvýšila.

Bylo tedy potřeba najít jiné řešení. Nakonec jsem se rozhodl pro koupi větší satelitní paraboly a polepení samolepící zrcadlovou fólií.

Nyní přišla na řadu volba modifikace a provedení motoru. Uvažoval jsem o nízkoteplotní variantě, motor by se rozběhl při nízké teplotě a produkoval elektřinu už

ráno a také k večeru, kdy není intenzita slunečního záření tak velká. Při použití nízkoteplotní varianty by nedošlo k využití potenciálu plného záření během poledne. Rozhodl jsem se pro klasickou vysokoteplotní variantu modifikace gama.

Moje solární elektrárna se Stirlingovým motorem byl spíše pokus, který měl demonstrovat princip. Při osazení paraboly profesionálním motorem by mohl najít koncept uplatnění v částečném zásobování rodinného domu elektřinou. Muselo by se jednat o motor plněný vodíkem nebo héliem a vysokým přetlakem pracovního media. Pak by elektrárna mohla mít výkon v řádech stovek Wattů nebo jednotek kilowattů.

Má solární elektrárna využívá atmosférický Stirlingův motoru modifikace gama. Foto je na obrázku 8.9 a 8.10. Za intenzivního slunečního záření elektrárna bez problémů rozsvítí několik vysoce svítivých diod.



Obr. 8.10 Boční pohled na model solární elektrárny se Stirlingovým motorem

## 9. STIRLINGŮV MOTOR V ČESKÉ REPUBLICE A VE SVĚTĚ

V současné době je kladen čím dál větší důraz na ekologii a snahu využít i jiné zdroje energie než jsou konvenční. To nahrává Stirlingovému motoru, který dokáže využít i jiná paliva než kapalná a plynná. Vývoj Stirlingova motoru se tedy rozvíjí v různých odvětvích. Největší zásluhu na tom má General Motor, Ford, Honda. Vývoj těchto společností probíhá hlavně v automobilovém průmyslu. V jiných oblastech je to CLEANERGY, Dean Kamen, MSI, NASA, v České republice se jedná o společnost TEDOM.

### 9.1. TEDOM

Další společnosti vyvíjí KGJ nebo agregáty na výrobu elektřiny. KGJ na bázi Stirlingova motoru vyvíjela také česká společnost TEDOM s.r.o. Rozhodnutí pustit se do vývoje kogenerační jednotky na bázi Stirlingova motoru padlo v roce 2001. TEDOM se rozhodl pustit se do vývoje od nuly. Vývoj začal na začátku roku 2002. V letech 2002 a 2003 byl vývoj částečně podporován Ministerstvem průmyslu a obchodu v rámci projektu „Výzkum a vývoj zařízení na kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla ve výkonové třídě mikrokogenerace na bázi Stirlingova motoru s možností spalování biomasy“. Další roky byl vývoj financován vlastními prostředky. Celkové náklady na vývoj se vyšplhaly přes 40 mil. Kč. Během vývoje se několikrát přehodnotilo původní nasazení jednotky Stirlingova motoru.

Jednotka Stirlingova motoru společnosti TEDOM měla tyto parametry:

- Výkon: 7 kW<sub>e</sub>.
- Otáčky: 1 500 min<sup>-1</sup>.
- Tlak hélia: 10 MPa.
- Elektrická účinnost: 22,1 %.

Roku 2008 se společnost rozhodla přenést dosavadní vývoj do společnosti Strojírny Bohdalice a. s., kde se snaží využít dosavadní vývoj v solární aplikaci Stirlingova motoru na bázi koncentračního systému. První komerční verze solární varianty by měla mít výkon 10 kW<sub>e</sub>. Cílové parametry solární aplikace by měly být tyto:

- Výkon motoru 11 kW<sub>e</sub> při 1 500 min<sup>-1</sup>.
- Elektrická účinnost min. 25 % při teplotách 650 °C/60 °C (teplota žárové hlavy/vstupní teplota do motoru).
- Pracovní médium helium.
- Maximální střední tlak pracovního plynu 14 MPa.
- Servisní interval 2 roky.
- Minimální životnost do generální opravy 25 000 hodin.
- Nízká cena motoru, zajišťující budoucí komerční úspěch solární jednotky.

## 9.2. CLEANERGY

Vývojem kogenerační jednotky na bázi Stirlingova motoru se zabývá také společnost CLEANERGY. Tato společnost je úspěšná a může se pochlubit komerčně nabízenou jednotkou CLEANERGY C9G o výkonu 9 kW<sub>e</sub>.

Technické parametry CLEANERGY C9G:

- Elektrický výkon: 2 - 9 kW<sub>e</sub>.
- Tepelný výkon: 8 - 25 kW<sub>t</sub>.
- Špičková celková účinnost: 92 - 96 %.
- Elektrická účinnost: 25 %.
- Servisní interval: 6 000 - 8 000 hodin.
- Celková životnost: 25 let.
- Palivo: ZP, bioplyn, skládkový plyn, kalový plyn.

Další výhody CLEANERGY C9G:

- Nízké emise.
- Kompaktní rozměry, prostorová nenáročnost.
- Tichý chod, nízké provozní vibrace.
- Pokročilý systém regulace výkonu.
- Bezúdržbový provoz, snadná obsluha.

Velkou nevýhodou této kogenerační jednotky jsou vysoké pořizovací náklady.



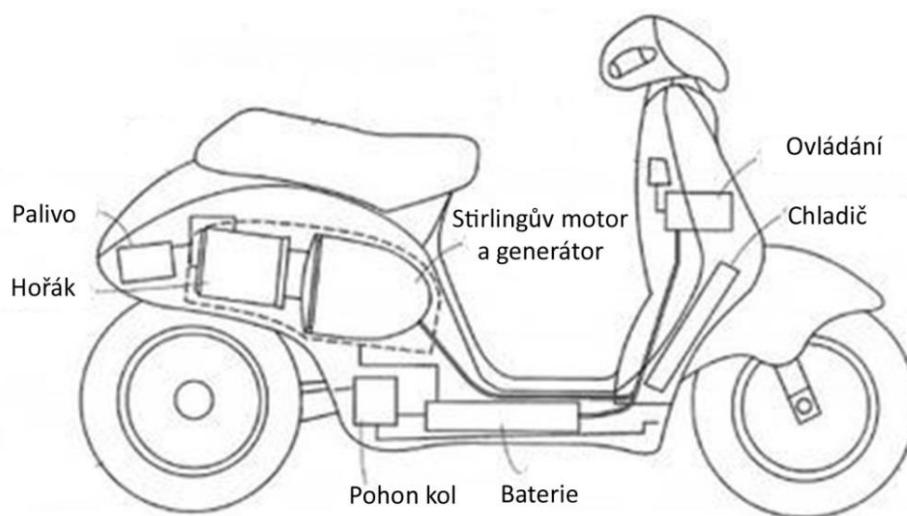
Obr. 9.1 Kogenerační jednotka se Stirlingovým motorem CLEANERGY C9G [42]

## 9.3. Dean Kamen

Vývojem Stirlingova motoru se zabýval také vynálezce Segway, Dean Kamen. Jeho cílem bylo vyrobit něco mezi kolem a skútre, který jak říkal: „Pojede na cokoli, co hoří.“ Do tohoto vynálezu vložil prostředky v hodnotě 50 mil. USD. V těchto případech, kdy se Stirlingův motor používá jako pohon, jde obvykle o hybridní systém.



To znamená, že Stirlingův motor jede v optimálních otáčkách, generátor produkuje elektrický proud, který se akumuluje v baterii, následně je využíván v elektromotoru pro pohon prostředku. Schéma konceptu znázorněno na obrázku 9.2.



Obr. 9.2 Skútr se Stirlingovým motorem [43]

#### 9.4. Honda

U spalovacích motorů instalovaných v automobilech je efektivně využívána přibližně jedna třetina paliva, další dvě třetiny odchází ze systému ve formě ztrát. Společnost Honda se rozhodla vyvinout Stirlingův motor, který bude umísťovat do výfukového potrubí automobilů a využije tak alespoň část tepla, které je jinak odváděno do ovzduší a není nijak využito.

#### 9.5. MSI

O Stirlingův motor se zajímá také společnost MSI. V roce 2002 si MSI patentovala systém chlazení základní desky počítače Stirlingovým motorem. Obrázek této základní desky je na obrázku 9.3.



Obr. 9.3 Základní deska počítače chlazená Stirlingovým motorem [44]

## 9.6. NASA

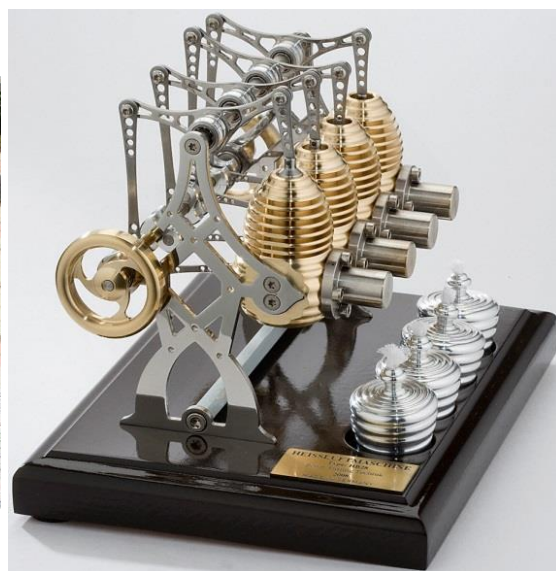
Národní úřad pro letectví a kosmonautiku NASA také vyvíjí Stirlingův motor. Potřebuje zdroj elektrické energie, který bude co nejmenší a bude stačit pro napájení vesmírné stanice. Zároveň potřebuje, aby byla elektrárna nenáročná na údržbu a byla bezporuchová. Své uplatnění najde na plánovaném výzkumném středisku na Měsíci nebo při letu na Mars. Jako zdroj tepla pro Stirlingův motor používá NASA plutonium 238.

## 9.7. Modelářství

Díky své jednoduché konstrukci a nenáročnosti na použité materiály je Stirlingův motor zajímavý také pro kutily a nadšence na celém světě. „Plechovkový“ model zvládne vyrobit s drobnou pomocí i malé dítě. Na internetu je k vidění spousta typů, předělávek a variant původního Stirlingova motoru. Některé kousky jsou opravdová mistrovská díla.



Obr. 9.4 Vysokoteplotní model SM [45]



Obr. 9.5 Vysokoteplotní model SM [46]

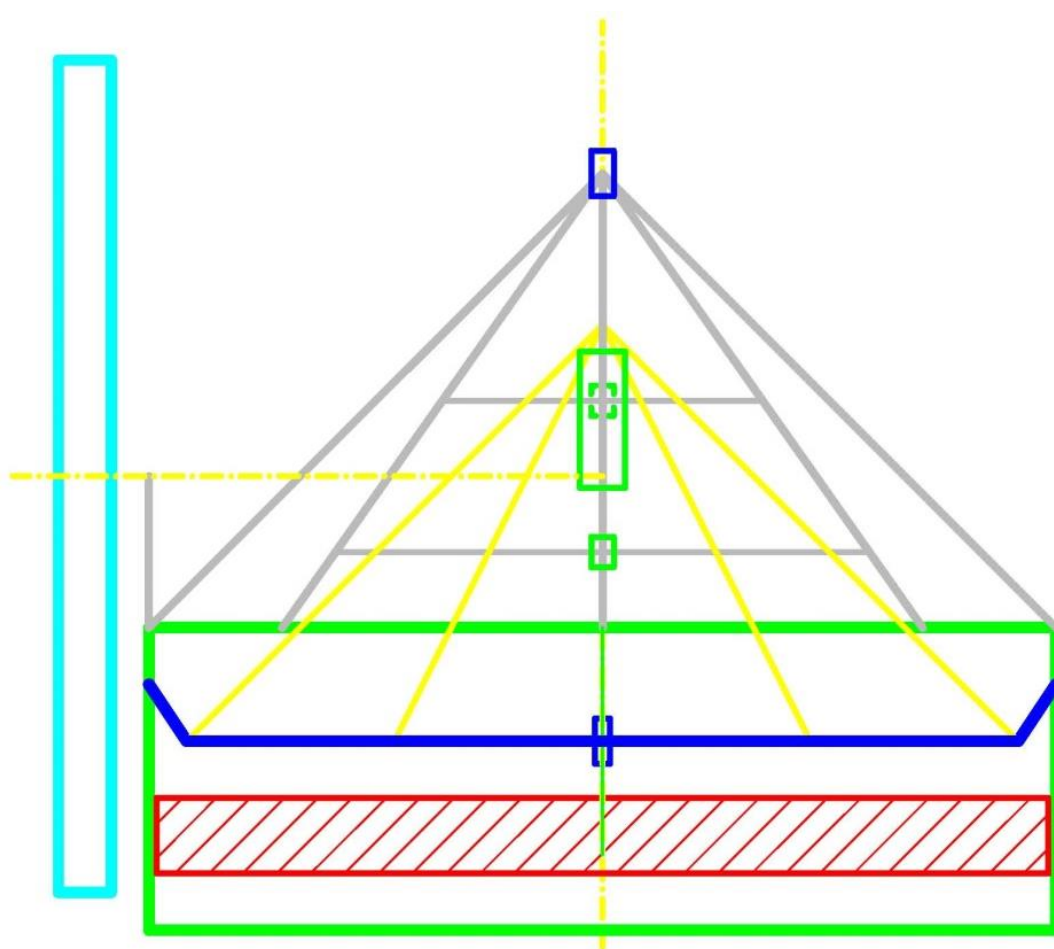
Extrémem mezi modely je nízkoteplotní provedení Stirlingova motoru, jedná se o modifikaci gama. Některé modely dokáží pracovat s extrémně nízkými rozdíly teplot a ke svému chodu jim stačí pouze teplo lidské ruky. Nejnižší realizovaný teplotní rozdíl je údajně pouze 2,4 °C. Tyto modely mají jen velmi malý výkon, který pokryje jen vlastní ztráty.





Obr. 9.6 Nízkoteplotní Stirlingův motor [47] Obr. 9.7 Nízkoteplotní Stirlingův motor [48]

## 10. NÍZKOTEPLTNÍ STIRLINGŮV MOTOR NA SOLÁRNÍ POHON



Obr. 10.1 Schéma nízkoteplotního Stirlingova motoru na solární pohon

## 10.1. Popis konceptu

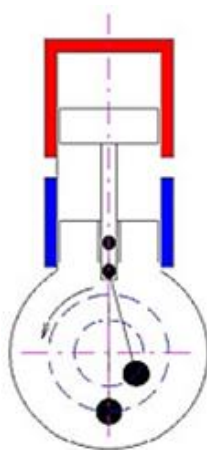
Zjednodušený popis konceptu elektrárny: V akumulační nádrži se bude shromažďovat olej ohřátý slunečním kolektorem. Horký olej se přečerpá na ohřívanou část motoru a ten se roztočí. Alternátor bude připojen na setrvačnick, mechanickou energii bude transformovat na elektrickou, ta se bude spotřebovávat přímo ve spotřebičích nebo se bude akumulovat v bateriích.

Obrovská výhoda tohoto konceptu je, že bude vyrábět elektřinu pouze, když bude potřeba. Na rozdíl od konvenčních způsobů transformace solární energie na elektrickou má tento koncept schopnost dodávat elektřinu také v noci!

Motor bude atmosférický, chlazený vodou, pracovní médium bude vzduch. Pro tyto parametry jsem se rozhodl z důvodu možnosti vyrobit většinu komponent v lépe vybavené domácí dílně.

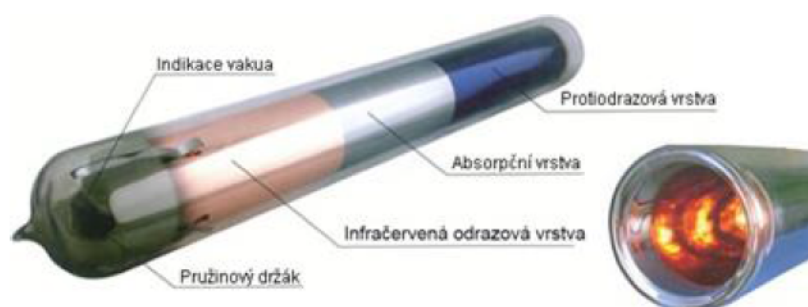
Zvažoval jsem jakou variantu motoru použít, jestli vysokoteplotní nebo nízkoteplotní. Vyšších výkonů by bylo dosaženo při použití vysokoteplotní varianty. Při použití této varianty by bylo náročné uchovávat tak horké medium, navíc by bylo problematické najít teponosné médium pro přenos tepla k ohřívané části motoru. Rozhodl jsem se tedy pro nízkoteplotní variantu. Bude dosaženo nižšího výkonu, ale motor bude schopen pracovat ve dne i v noci.

Dále přišla na řadu volba modifikace. Vzhledem k volbě nízkoteplotní varianty připadala v úvahu modifikace beta nebo gama. Z konstrukčních důvodů jsem se rozhodl pro modifikaci beta. Schéma modifikace beta můžeme vidět na obrázku 10.2.



Obr. 10.2 Modifikace beta [49]

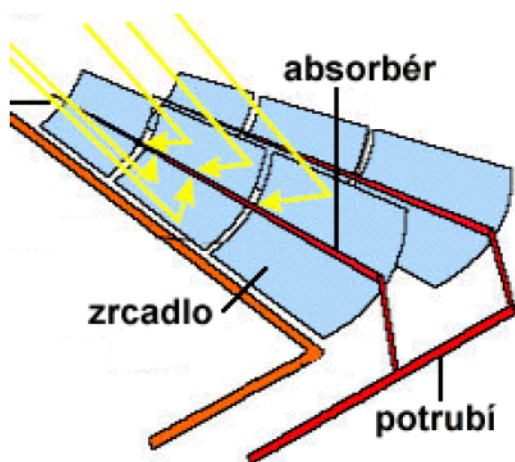
Ve srovnání s jinými aplikacemi Stirlingova motoru je potřeba poměrně nízká teplota. Vzhledem k solárním kolektorům se jedná o vysokou teplotu. Z tohoto důvodu musím uvažovat o vakuových trubicových nebo žlabových sběračích. Vakuové trubicové kolektory dokáží ohřát médium přes 300 °C, žlabové sběrače dosahují teplot okolo 550 °C.



Obr. 10.3 Řez vakuovým trubicovým kolektorem [50]



Obr. 10.4 Vakuový trubicový kolektor [51]



Obr. 10.5 Princip žlabového sběrače [52]



Obr. 10.6 Skutečný žlabový sběrač [53]

Bylo potřeba zvolit také teplonosné médium. V první chvíli mě napadla voda, ale toto médium není možné ohřát při atmosférickém tlaku na požadovanou teplotu. Pokud bych v celém systému zvýšil tlak, pak by to bylo možné. Tímto krokem by se zvýšily nároky na konstrukci systému, a to jsem nechtěl. Zjistil jsem, že posunutí bodu varu na 200 °C by znamenalo zvýšit tlak v celém systému na 1,555 MPa.

Jako nejvhodnější teplonosné médium se zdá být olej. Toto médium je možné bez problému ohřát na požadovanou teplotu, má velmi dobrou měrnou tepelnou kapacitu. Výhodou oproti vodě je, že chrání před korozí. Jako vhodný typ oleje se jeví takový, který se používá při zahřívání obalovaných směsí v termo kotlích.

Cílem konceptu je, aby bylo možné produkovat elektřinu pouze, když bude potřeba. Sluncem nahřátý olej se bude shromažďovat v tepelně izolované akumulční nádrži horkého oleje. Ochlazený olej se bude shromažďovat v druhé akumulční nádrži. Teplem se bude objekt zásobovat z tohoto zásobníku v případě, že nebude dostatečná intenzita slunečního záření k tomu, aby se olej ohřál na požadovanou teplotu.

Elektrická energie se bude spotřebovávat v místě výroby. Pro účely konceptu bude nejefektivnější transformovat mechanickou energii na elektrickou pomocí alternátoru, má vysokou účinnost transformace, výstupem je střídavý proud.

Systém je možné využít také pro jiné účely. Výstupem jednotky bude mechanická energie, ta je využitelná různými způsoby, například se dá využít pro čerpání vody.

Výsledný výkon zdroje se odvíjí od použitého motoru. V tomto případě se jedná o nízkoteplotní atmosférický motor plněný vzduchem a chlazený vodou. V ideovém návrhu počítám při teplotě teplotnosného média 200 °C s výkonem cca 3 kW<sub>e</sub>.

Ideový návrh počítá s možností regulovat výkon motoru. Bude tak dosaženo efektivního pokrytí aktuální spotřeby. Nedostatky elektřiny budou pokrývány ze sítě, případné přebytky elektřiny budou akumulovány v akumulátorech elektřiny. Přednostně bude motor pracovat ve špičkách tak, aby byla energie využívána co nejefektivněji, většina elektrické energie se rovnou spotřebuje.

## 10.2. Přehled rozměrů a teoretického výkonu

Kvalifikovaným odhadem jsem určil, že se bude olej ohřívat na 200 °C. Následující výpočty a grafy vyplývají ze Schmidty teorie. Vypracoval a publikoval ji roku 1871 Gustav Schmidt. Teorie pracuje se zjednodušujícími a idealizujícími podmínkami.

Koncept počítá s možností změny zdvihu přemísťovacího pístu, bude nastavitelný od 60 mm do 150 mm. Vlivem této regulace bude možné měnit výkon motoru a efektivněji tak využívat energii teplotnosného média, přizpůsobovat se aktuální spotřebě elektrické energie. Použitím této regulace je možné využít všechny navržené mechanismy a také stejnou teplotu teplotnosného média.

### a) Výpočet objemů, tlaků a výkonu pro min. zdvih přemísťovacího pístu

**Zdvihový objem kompresního prostoru:**

$$V_{ZK} = \frac{\pi * D_{ZK}^2}{4} * l_{ZK} \quad (1) [1]$$

$$V_{ZK} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,15 = 0,169646003 \quad [m^3]$$

**Zdvihový objem expanzního prostoru:**

$$V_{ZE} = \frac{\pi * D_{ZE}^2}{4} * l_{ZE} \quad (2) [1]$$

$$V_{ZE} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,06 = 0,067858401 \quad [m^3]$$

**Objem škodlivého prostoru kompresního prostoru:**

$$V_{DK} = \frac{\pi * D_{DK}^2}{4} * l_{DK} \quad (3) [1]$$

$$V_{DK} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,01 = 0,011309734 \quad [m^3]$$

**Objem škodlivého prostoru expanzního prostoru:**

$$V_{DE} = S_{DE} * l_P + \frac{\pi * D_{DK}^2}{4} * l_{DE} \quad (4) [1]$$

$$V_{DE} = 0,0113 * 0,1 + \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,09 = 0,102917602 \quad [m^3]$$

**Objem regenerátoru:**

$$V_R = \frac{\pi * D_R^2}{4} * l_R \quad (5) [1]$$

$$V_R = \frac{\pi * 0}{4} * 0 = 0 \quad [m^3]$$

**Okamžitý objem expanzního prostoru:**

$$V_E = \frac{V_{ZE}}{2} * (1 - \cos \alpha) + V_{DE} \quad (6) [1]$$

$$V_E = \frac{0,067858401}{2} * (1 - \cos 90) + 0,00113 = 0,136846803 \quad [m^3]$$

**Okamžitý prostor kompresního prostoru pro modifikaci beta:**

$$V_K = \frac{V_{ZE}}{2} * (1 + \cos \alpha) + \frac{V_{ZK}}{2} * [1 - \cos(\alpha - \phi)] + V_{DK} \quad (7) [1]$$

$$V_K = \frac{0,067858401}{2} * (1 + \cos 90) + \frac{0,169646003}{2} * [1 - \cos(90 - 90)] + 0,011309734 = 0,045238934 \quad [m^3]$$

**Okamžitý celkový objem:**

$$V = V_E + V_K + V_R \quad (8) [1]$$

$$V = 0,136846803 + 0,045238934 + 0 = 0,182085737 \quad [m^3]$$

**Hmotnost plynu (vzduchu):**

$$m = \frac{p}{V} * \frac{r}{T} \quad (9) [1]$$

$$m = \frac{101\,325}{0,182085737} * \frac{287}{293,15} = 0,219290968 \quad [Kg]$$

### Tlak plynu (vzduchu):

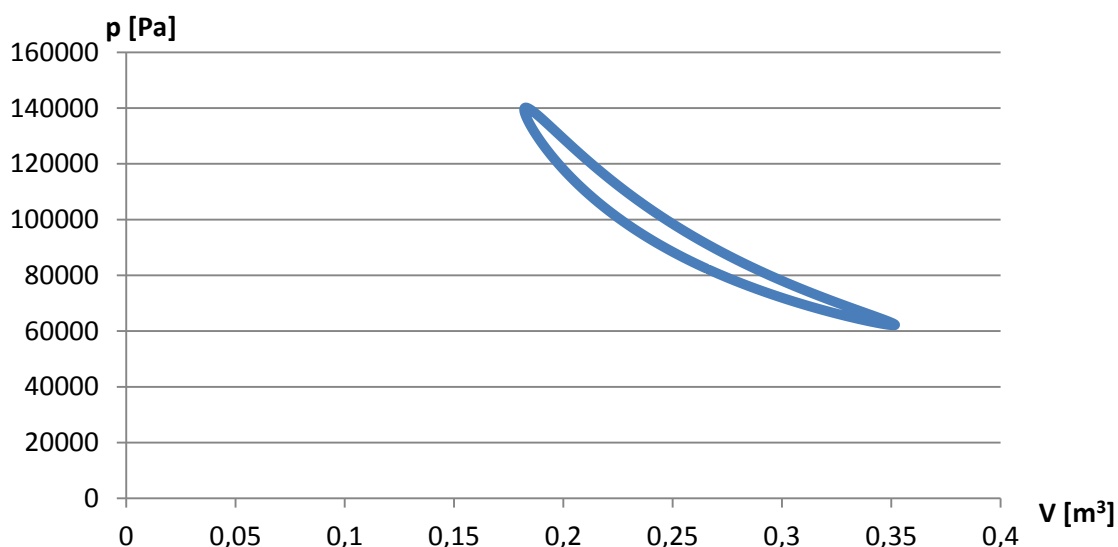
$$p = \frac{m \cdot r}{\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_K}{T_K}} \quad (10) [1]$$

$$p = \frac{0,219290968 \cdot 287}{\frac{0,136846803}{473} + \frac{0}{388} + \frac{0,045238934}{303}} = 143487,5076 \quad [\text{Pa}]$$

### pV diagram

Pro výpočet rozměrů a výkonu pro min. zdvih přemísťovacího pístu jsem použil tabulkový procesor Microsoft Excel. Vypočítal jsem okamžitý objem kompresního prostoru, okamžitý objem expanzního prostoru, následně okamžitý celkový objem a tlak plynu pro každý stupeň cyklu. Pro vypočtené tlaky a objemy jsem vytvořil pV diagram.

Pro zjištění teoretické vnitřní práce cyklu  $a_c$  jsem použil tzv. proužkovou metodu. Nejprve jsem určil teoretickou vnitřní práci pro každý stupeň cyklu. Po sečtení těchto dílčích teoretických vnitřních prací jsem dostal celkovou teoretickou vnitřní práci cyklu  $a_c = 1\,543 \text{ J}$ .



Obr 10.7 pV diagram minimálního zdvihu přemísťovacího pístu

$$P_{VN} = n \cdot a_c \quad (11) [1]$$

$$P_{VN} = 1,5 \cdot 1\,543 = 2\,315 \quad [\text{W}]$$

Abych dostal teoretický vnitřní výkon  $P_{VN}$  jednotky Stirlingova motoru, zvolil jsem, při jakých otáčkách bude pracovat  $n = 90 \text{ ot/min}$ . Při těchto otáčkách bude mít jednotka SM teoretický vnitřní výkon:  $P_{VN} = 2,315 \text{ kW}$ .

## **b) Výpočet objemů, tlaků a výkonu pro max. zdvih přemísťovacího pístu**

**Zdvihový objem kompresního prostoru:**

$$V_{ZK} = \frac{\pi * D_{ZK}^2}{4} * l_{ZK} \quad (1) \quad [1]$$

$$V_{ZK} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,15 = 0,169646003 \quad [m^3]$$

**Zdvihový objem expanzního prostoru:**

$$V_{ZE} = \frac{\pi * D_{ZE}^2}{4} * l_{ZE} \quad (2) \quad [1]$$

$$V_{ZE} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,15 = 0,169646003 \quad [m^3]$$

**Objem škodlivého prostoru kompresního prostoru:**

$$V_{DK} = \frac{\pi * D_{DK}^2}{4} * l_{DK} \quad (3) \quad [1]$$

$$V_{DK} = \frac{\pi * 1,2^2}{4} * 0,01 = 0,011309734 \quad [m^3]$$

**Objem škodlivého prostoru expanzního prostoru:**

$$V_{DE} = S_{DE} * l_{DE} \quad (4) \quad [1]$$

$$V_{DE} = 0,0113 * 0,1 = 0,00113 \quad [m^3]$$

**Objem regenerátoru:**

$$V_R = \frac{\pi * D_R^2}{4} * l_R \quad (5) \quad [1]$$

$$V_R = \frac{\pi * 0}{4} = 0 \quad [m^3]$$

**Okamžitý objem expanzního prostoru:**

$$V_E = \frac{V_{ZE}}{2} * (1 - \cos \alpha) + V_{DE} \quad (6) \quad [1]$$

$$V_E = \frac{0,169646003}{2} * (1 - \cos 90) + 0,00113 = 0,085953002 \quad [m^3]$$

**Okamžitý prostor kompresního prostoru pro modifikaci beta:**

$$V_K = \frac{V_{ZE}}{2} * (1 + \cos \alpha) + \frac{V_{ZK}}{2} * [1 - \cos(\alpha - \phi)] + V_{DK} \quad (7) \quad [1]$$

$$\begin{aligned} V_K &= \frac{0,169646003}{2} * (1 + \cos 90) + \frac{0,169646003}{2} * \\ &\quad * [1 - \cos(90 - 90)] + 0,011309734 = \\ &= 0,096132735 \end{aligned} \quad [m^3]$$

**Okamžitý celkový objem:**

$$V = V_E + V_K + V_R \quad (8) [1]$$

$$V = 0,085953002 + 0,096132735 + 0 = 0,182085737 \quad [\text{m}^3]$$

**Hmotnost plynu (vzduchu):**

$$m = \frac{p}{V} * \frac{r}{T} \quad (9) [1]$$

$$m = \frac{101\,325}{0,182085737} * \frac{287}{293,15} = 0,219290968 \quad [\text{Kg}]$$

**Tlak plynu (vzduchu):**

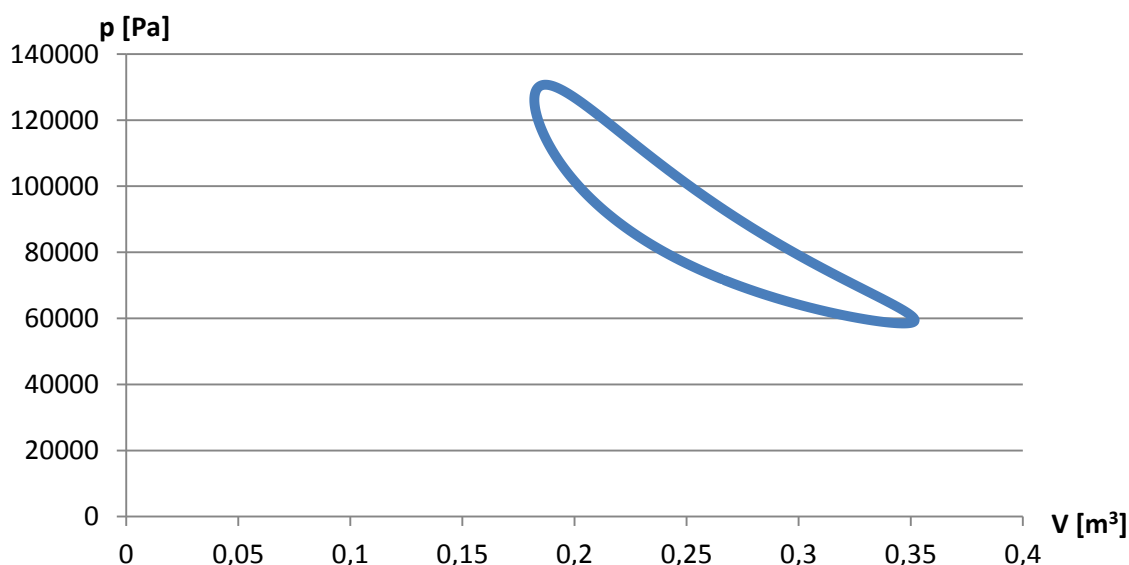
$$p = \frac{m * r}{\frac{V_E}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_K}{T_K}} \quad (10) [1]$$

$$p = \frac{0,219290968 * 287}{\frac{0,085953002}{473} + \frac{0}{388} + \frac{0,096132735}{303}} = 126128,1547 \quad [\text{Pa}]$$

**pV diagram**

Pro výpočet rozměrů a výkonu pro max. zdvih přemísťovacího pístu jsem použil tabulkový procesor Microsoft Excel. Vypočítal jsem okamžitý objem kompresního prostoru, okamžitý objem expanzního prostoru, následně okamžitý celkový objem a tlak plynu pro každý stupeň cyklu. Pro vypočtené tlaky a objemy jsem vytvořil pV diagram.

Pro zjištění teoretické vnitřní práce cyklu  $a_c$  jsem použil tzv. proužkovou metodu. Nejprve jsem určil teoretickou vnitřní práci pro každý stupeň cyklu. Po sečtení těchto dílčích teoretických vnitřních prací jsem dostal celkovou teoretickou vnitřní práci cyklu  $a_c = 3\,181\text{ J}$



Obr 10.8 pV diagram maximálního zdvihu přemísťovacího pístu



$$P_{VN} = n * a_c \quad (11) \quad [1]$$

$$P_{VN} = 1,5 * 3\,181 = 4\,771 \quad [W]$$

Abych dostal teoretický vnitřní výkon  $P_{VN}$  jednotky Stirlingova motoru, zvolil jsem, při jakých otáčkách bude pracovat  $n = 90$  ot/min. Při těchto otáčkách bude mít jednotka SM teoretický vnitřní výkon:  $P_{VN} = 4,771$  kW.

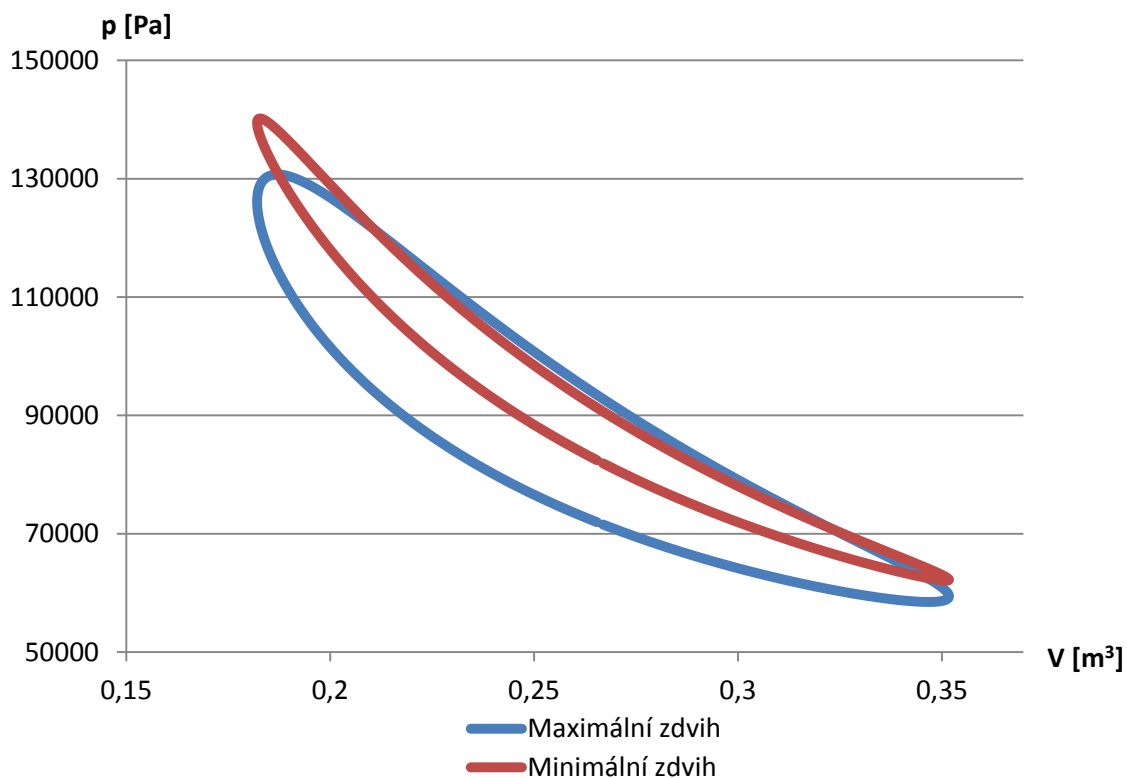
### c) Zhodnocení výkonu při max. a min. zdvihu přemísťovacího pístu

Při maximálním zdvihu přemísťovacího pístu má jednotka SM teoretický vnitřní výkon 4,77 kW. Při minimálním zdvihu přemísťovacího pístu má jednotka SM teoretický vnitřní výkon 2,32 kW.

Teoretický vnitřní výkon jednotky SM by měl jít transformovat na mechanický výkon s účinností 90 %. Při maximálním zdvihu přemísťovacího pístu bude mechanický výkon jednotky SM 4,293 kW. Při minimálním zdvihu přemísťovacího pístu bude mít jednotka SM mechanický výkon 2,088 kW.

Elektrický výkon zjistím transformací z mechanického výkonu s účinností 90 %. Při minimálním zdvihu přemísťovacího pístu bude elektrický výkon jednotky SM **1,879 kW<sub>e</sub>**. Při maximálním zdvihu přemísťovacího pístu bude elektrický výkon jednotky SM **3,864 kW<sub>e</sub>**.

Porovnání pV diagramů min. a max. zdvihu přemísťovacího pístu je na následujícím obrázku 10.9.



Obr 10.9 Porovnání pV diagramů min. a max. zdvihu přemísťovacího pístu

### 10.3. Porovnání vakuového kolektoru a žlabového sběrače

Jak už bylo uvedeno v přecházejícím textu pracovní teplota 200 °C je z pohledu teplovzdušných motorů nízká. Z pohledu konvenčních solárních systémů je tato teplota vysoká. Pro ohřev teplonosného média jsem porovnal dva solární systémy: vakuový kolektor a žlabový sběrač. Srovnání jsem provedl pro maximální výkon motoru. Vakuový kolektor i žlabový sběrač jsem porovnával při stagnační teplotě.

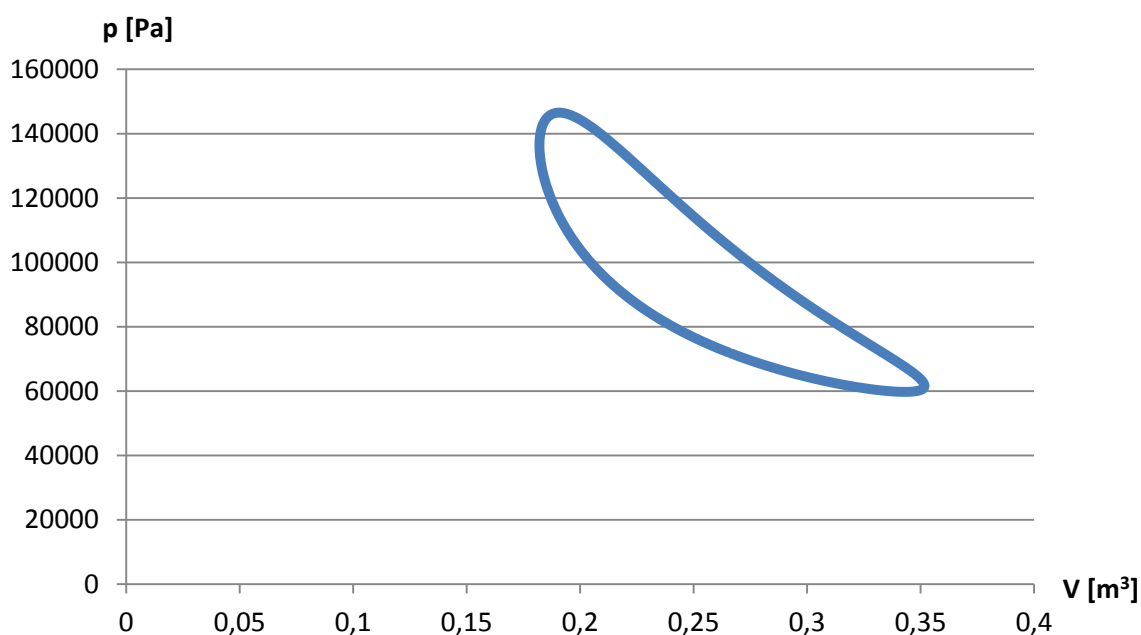
#### a) Výpočet výkonu při použití Vakuového trubicového kolektoru

Důkladně jsem prozkoumal nabídku vakuových trubicových kolektorů. Pro účely tohoto konceptu se velmi dobře hodí kolektor AMK-Collectra OPC 15 od výrobce SPF. Kolektor má oproti ostatním typům výhodu, že je na spodní straně umístěn odražeč. Podrobná specifikace tohoto kolektoru je v příloze F.

Stagnační teplota kolektoru je 323 °C.

Při výpočtu výkonu při použití Vakuového trubicového kolektoru jsem postupoval stejně jako u výpočtu výkonu při min. a max. zdvihu přemísťovacího pístu. Použil jsem tabulkový procesor Microsoft Excel. Vypočítal jsem okamžitý objem kompresního prostoru, okamžitý objem expanzního prostoru, následně okamžitý celkový objem a tlak plynu pro každý stupeň cyklu. Pro vypočtené tlaky a objemy jsem vytvořil pV diagram.

Pro zjištění teoretické vnitřní práce cyklu  $a_c$  jsem použil tzv. proužkovou metodu. Nejprve jsem určil teoretickou vnitřní práci pro každý stupeň cyklu. Po sečtení těchto dílčích teoretických vnitřních prací jsem dostal celkovou teoretickou vnitřní práci cyklu  $a_c = 4\,906\text{ J}$ .



Obr 10.10 pV diagram vakuového trubicového kolektoru

Abych dostal teoretický vnitřní výkon  $P_{VN}$  jednotky Stirlingova motoru, zvolil jsem, při jakých otáčkách bude pracovat  $n = 90$  ot/min. Při těchto otáčkách bude mít jednotka SM teoretický vnitřní výkon:  $P_{VN} = 7\,359$  W.

### **b) Výpočet výkonu při použití žlabového sběrače**

Důkladně jsem prozkoumal nabídku žlabových sběračů. Pro účely tohoto konceptu se velmi dobře hodí kolektor NEP PolyTrough 1800 od výrobce SPF.

U žlabových sběračů se stagnační teplota neuvádí. Pro účely porovnání obou systémů jsem ji spočítal. Podrobná specifikace žlabového sběrače je v příloze G.

#### **Rovnice účinnostní charakteristiky kolektoru:**

$$\mu = \mu_0 - a_1 * A - a_2 * A^2 * I \quad (12) \quad [6]$$

Pokud nebudu ze systému nic odebírat, pak bude účinnost nulová, dostanu tedy stagnační teplotu.

$$0 = 0,689 - 0,36 * A - 0,0011 * A^2 * I$$

$$A = 0,533288 \quad [K * m^2 * W^{-1}]$$

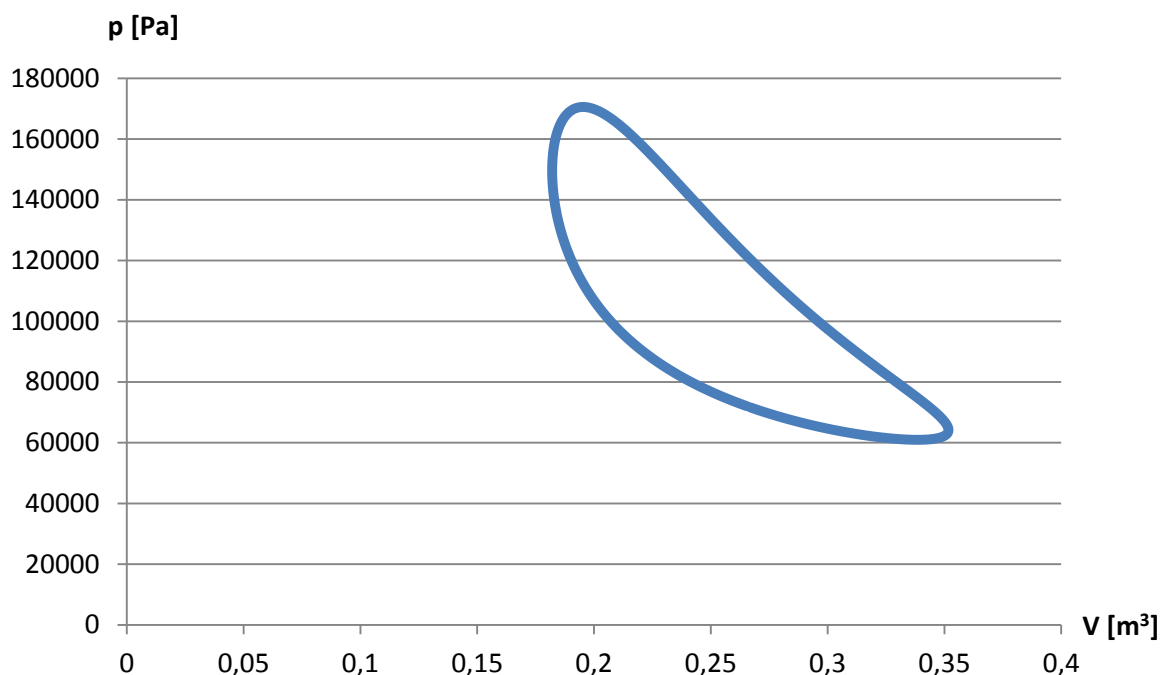
$$A = \frac{t_s - t_e}{I} \rightarrow t_s = A * I + t_e \quad (13) \quad [6]$$

$$t_s = 0,533288 * 1000 + 25 = 558 \quad [^{\circ}C]$$

#### **pV diagram**

Při výpočtu výkonu při použití žlabového sběrače jsem postupoval stejně jako u výpočtu výkonu při min. a max. zdvihu přemísťovacího pístu. Použil jsem tabulkový procesor Microsoft Excel. Vypočítal jsem okamžitý objem kompresního prostoru, okamžitý objem expanzního prostoru, následně okamžitý celkový objem a tlak plynu pro každý stupeň cyklu. Pro vypočtené tlaky a objemy jsem vytvořil pV diagram.

Pro zjištění teoretické vnitřní práce cyklu  $a_c$  jsem použil tzv. proužkovou metodu. Nejprve jsem určil teoretickou vnitřní práci pro každý stupeň cyklu. Po sečtení těchto dílčích teoretických vnitřních prací jsem dostal celkovou teoretickou vnitřní práci cyklu  $a_c = 7\,388$  J.



Obr 10.11 pV diagram žlabového sběrače

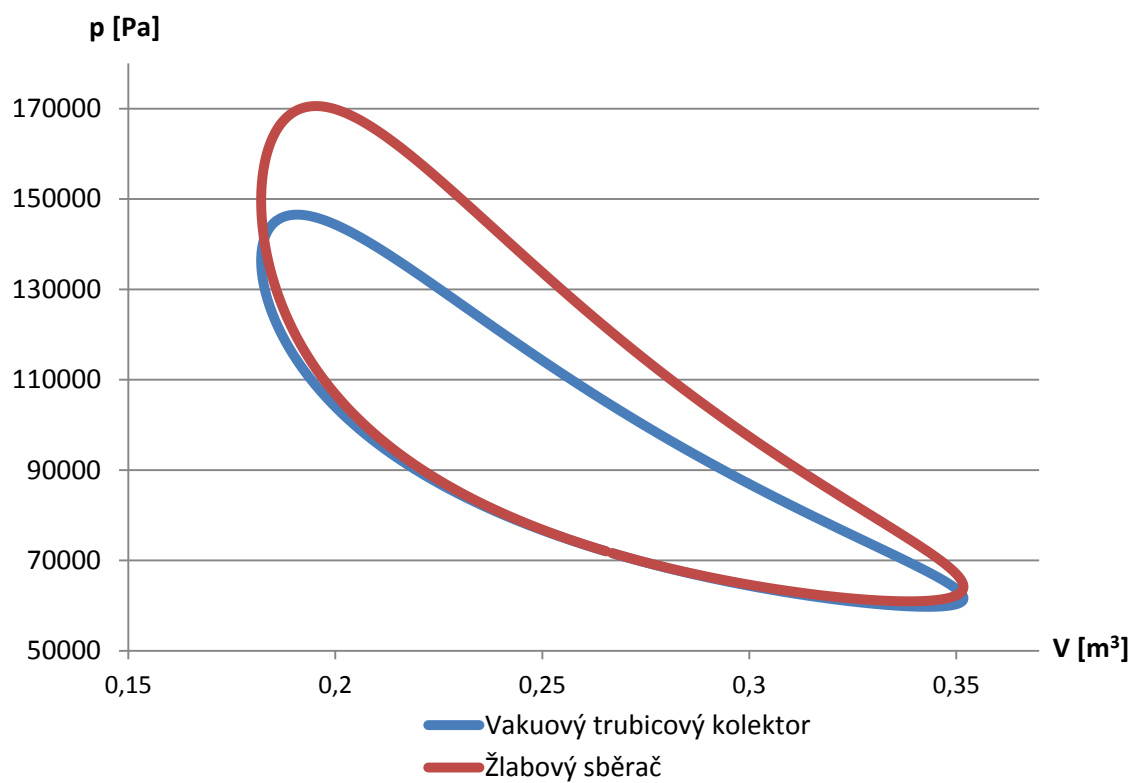
Abych dostal teoretický vnitřní výkon  $P_{VN}$  jednotky Stirlingova motoru, zvolil jsem, při jakých otáčkách bude pracovat  $n = 90$  ot/min. Při těchto otáčkách bude mít jednotka SM teoretický vnitřní výkon:  $P_{VN} = 11\,082$  W.

### c) Zhodnocení výkonu při použití tohoto kolektoru a sběrače.

Z výpočtu a dříve uvedeného vyplývá, že velmi záleží na vstupní teplotě teplotního média. S rostoucí teplotou se výrazně zvyšuje výkon motoru.

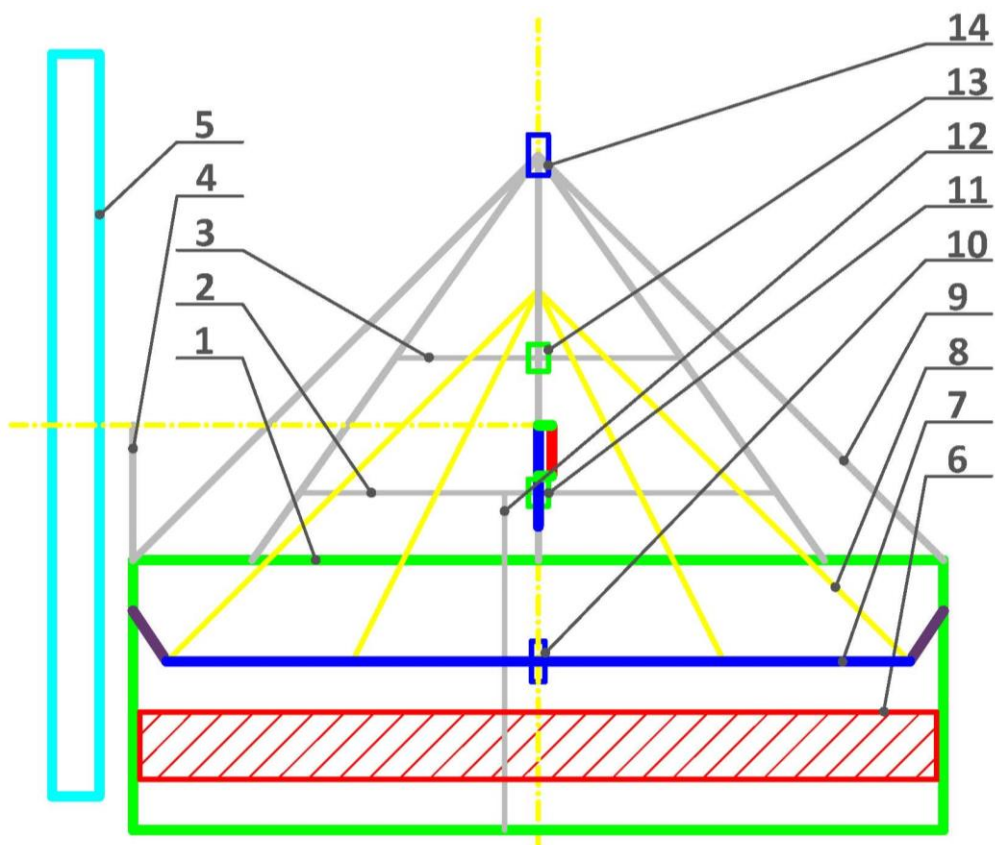
Při použití vakuového trubicového kolektoru by měla jednotka SM elektrický výkon  $5,96$  kW<sub>e</sub>. Při použití žlabového sběrače by měla jednotka SM elektrický výkon  $8,98$  kW<sub>e</sub>. Vypočtené elektrické výkony jsou teoretické a orientační. Teplot, se kterými je počítáno, by ve skutečnosti nebylo dosaženo. Ale pro srovnání vakuového trubicového kolektoru a žlabového sběrače jsou stagnační teploty systémů optimální. Zvolené teplotní médium navíc můžeme ohřát maximálně na  $350$  °C.

Porovnání pV diagramů kolektoru a sběrače je na obrázku 10.12.



Obr 10.12 Porovnání pV diagramů kolektoru a sběrače

#### 10.4. Konstrukce nízkoteplotního Stirlingova motoru



Obr. 10.13 Ideové schéma jednotky nízkoteplotního Stirlingova motoru

- 1 – Expanzní válec.
- 2 – Nosná konstrukce spodního kloubu přemísťovacího pístu.
- 3 – Nosná konstrukce horního kloubu přemísťovacího pístu.  
Oba tyto klouby jsou součástí pákového mechanismu, který zajišťuje regulaci zdvihu přemísťovacího pístu.
- 4 – Podpěra hřídele setrvačnicku, druhá podpěra je umístěna ve vertikální ose motoru.
- 5 – Setrvačnick.
- 6 – Přemísťovací píst.  
Píst musí být vyroben z lehkého materiálu, aby nebylo potřeba příliš energie na jeho zastavení a opětovné uvedení do chodu v horní a dolní úvrati. Na tento píst nepůsobí velké síly. Uvnitř motoru nebude příliš velká teplota. Při konstrukci pístu je nutné brát na tyto skutečnosti ohled.  
Správný pohyb pístu v ose zajišťuje ojnice pístu (15) a vodící tyč (12).
- 7 – Pracovní píst. Píst je s válcem spojen pružnou blánou – ve schématu je znázorněna fialovou barvou. Blána je trvale spojena s válcem na jednom místě. Tímto způsobem je zajištěno snadné těsnění celého prostoru. Navíc je odstraněno tření pracovního pístu, které by zbytečně snižovalo výkon motoru.  
Pohyb pístu v ose zajišťuje vedení pracovního pístu (14) a vodící tyč (12).
- 8 – Nosná konstrukce pracovního pístu. Konstrukce je k pístu připevněna na osmi místech, aby byl píst rovnoměrně zatěžován a zvedán.
- 9 – Nosná konstrukce motoru, skládá se z osmi podpěr.
- 10 – Těsnění pracovního prostoru. Toto je jediné místo, kde může vzduch (pracovní médium) ze systému unikat.
- 11 – Spodní kloub přemísťovacího pístu.
- 12 – Vodící tyč přemísťovacího a pracovního pístu. Z pohledu obou pístů zajišťuje správný pohyb ve vertikální ose motoru.  
Z pohledu přemísťovacího pístu ještě zajišťuje, aby nedošlo k poškození („vymačkání“) těsnění pracovního prostoru (10), vlivem pohybu ojnice přemísťovacího pístu, který je kruhový.
- 13 – Horní kloub přemísťovacího pístu.
- 14 – Vedení pracovního pístu – Zajišťuje správný pohyb pracovního pístu.



## 10.5. Výpočet množství teplotnosného média

Množství oleje vypočítám tak, že převedením Wh na J zjistím, kolik energie potřebuji na hodinu chodu motoru o daném výkonu. Následně si zvolím teplotu, na jakou budu olej ochlazovat a vypočítám množství oleje.

Důkladně jsem prozkoumal nabídku teplotnosných médií. Pro účely tohoto konceptu se velmi dobře hodí olej výrobce MOL-LUB Ltd, typ Thermol 68. Podrobná specifikace oleje je v příloze H.

Výhody oleje Thermol 68:

- Výborná tepelná stabilita.
- Vynikající vlastnosti pro přenos tepla.
- Není toxický.
- Odolnost proti korozi a oxidaci.
- Snadná likvidace.

Při požadované teplotě (200 °C) má olej Thermol 68 tyto vlastnosti:

- Hustota:  $\rho = 760 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Měrná tepelná kapacita:  $c_p = 2\,530 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

### a) Množství oleje pro max. zdvih přemísťovacího pístu

**Převod Wh na J:**

$$\text{Wh} \cdot 3\,600 = \text{J}$$

$$3\,864 \cdot 3\,600 = 13\,910\,400 \quad [\text{J}]$$

**Množství oleje pro max. zdvih přemísťovacího pístu:**

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (14) \quad [5]$$

$$m = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta t} = \frac{13\,910\,400}{2\,530 \cdot 20} = 275 \quad [\text{Kg}]$$

**Přepočet množství oleje na litry:**

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (15) \quad [5]$$

$$V = \frac{275}{760} = 0,3617 \quad [\text{m}^3]$$

$$V = 361,7 \quad [\text{l}]$$

Výpočtem jsem zjistil, že potřebuji 362 l oleje o teplotě 200 °C, aby motor dodával výkon 3 864 W po dobu jedné hodiny, teplota oleje klesne o 20 °C.



### **b) Množství oleje pro min. zdvih přemísťovacího pístu**

**Převod Wh na J:**

$$Wh * 3\,600 = J$$

$$1\,879 * 3\,600 = 6\,764\,400 \quad [J]$$

**Množství oleje pro min. zdvih přemísťovacího pístu:**

$$Q = m * c_p * \Delta t \quad (14) \quad [5]$$

$$m = \frac{Q}{c_p * \Delta t} = \frac{6\,764\,400}{2\,530 * 20} = 134 \quad [Kg]$$

**Přepočet množství oleje na litry:**

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (15) \quad [5]$$

$$V = \frac{15,7}{760} = 0,1759 \quad [m^3]$$

$$V = 175,9 \quad [l]$$

Výpočtem jsem zjistil, že pro minimální zdvih přemísťovacího pístu potřebuji 176 l oleje o teplotě 200 °C, aby motor dodával výkon 1 879 W po dobu jedné hodiny, teplota oleje klesne o 20 °C.

### **c) Zhodnocení**

Pro výkon motoru 3 864 Wh potřebuji 362 l oleje. Pro výkon motoru 1 879 Wh potřebuji 176 l oleje. Z technologických důvodů jsem navrhl akumulární nádrž na olej o objemu 980 l. Toto množství teplotosného média vystačí na 2,7 h při maximálním zdvihu přemísťovacího pístu a na 5,6 h při minimálním zdvihu přemísťovacího pístu. Jak bylo popsáno v přechozím textu, koncept je tvořen tak, aby dodával elektřinu pouze, když je potřeba a to zejména v době špiček.

## 10.6. Základní specifikace nízkoteplotního Stirlingova motoru

Základní specifikace jednotky nízkoteplotního Stirlingova motoru vyplývají z konstrukčního a technologického návrhu. Rozměry byly vypočteny stanovením požadovaného výkonu a následně zpětným dopočtem ze Schmidovy teorie.

- Pracovní tlak: Atmosférický.
- Modifikace: Beta.
- Vnitřní médium: Vzduch.
- Teplotní provedení: Nízkoteplotní.
- Teplota teplonosného média: 200 °C.
- Teplonosné médium: Olej.
- Chlazení: Voda.
- Otáčky: 90 ot/min.
- Hluk: cca 25 dB(A).
- Rozměry v mm: (h×š×v): 1200 × 1200 × 1150.
- Průměr válce: 1 200 mm.
- Zdvih přemísťovacího pístu: 60 – 150 mm.
- Zdvih pracovního pístu: 150 mm.
- Elektrický výkon (modulovaný): 1,88 – 3,86 kW<sub>e</sub>.
- Tepelný výkon (modulovaný): 0 – 5,8 kW<sub>t</sub>.
- Výstupní teplota topné vody (konstantní): 10 - 95 °C.
- Teplota vratné vody (variabilní): 5 - 95 °C.
- Max. teplota spalin: nejsou.
- Emise CO: 0 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>.
- Emise NO<sub>x</sub>: 0 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>.

## 11. IMPLEMENTACE SOLÁRNÍHO NÍZKOTEPLTNÍHO SM

Koncept solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru budu implementovat do reálného objektu jedné průmyslové společnosti nedaleko mého bydliště. Jedná se spíše o menší společnost. Data o spotřebě zemního plynu a elektrické energie jsou uvedena v následujících tabulkách.

### 11.1. Popis současného stavu zásobování objektu tepelnou energií a elektrickou energií

V současnosti je objekt zásobován tepelnou energií ze starého plynového kotle. Elektrickou energií je objekt zásobován z distribuční soustavy.

#### a) Zemní plyn

Spotřeba zemního plynu v m <sup>3</sup>	
Leden	4 940
Únor	3 763
Březen	3 294
Duben	1 251
Květen	135
Červen	125
Červenec	89
Srpen	81
Září	121
Říjen	290
Listopad	1 760
Prosinec	2 866
<b>Celkem</b>	<b>18 715</b>

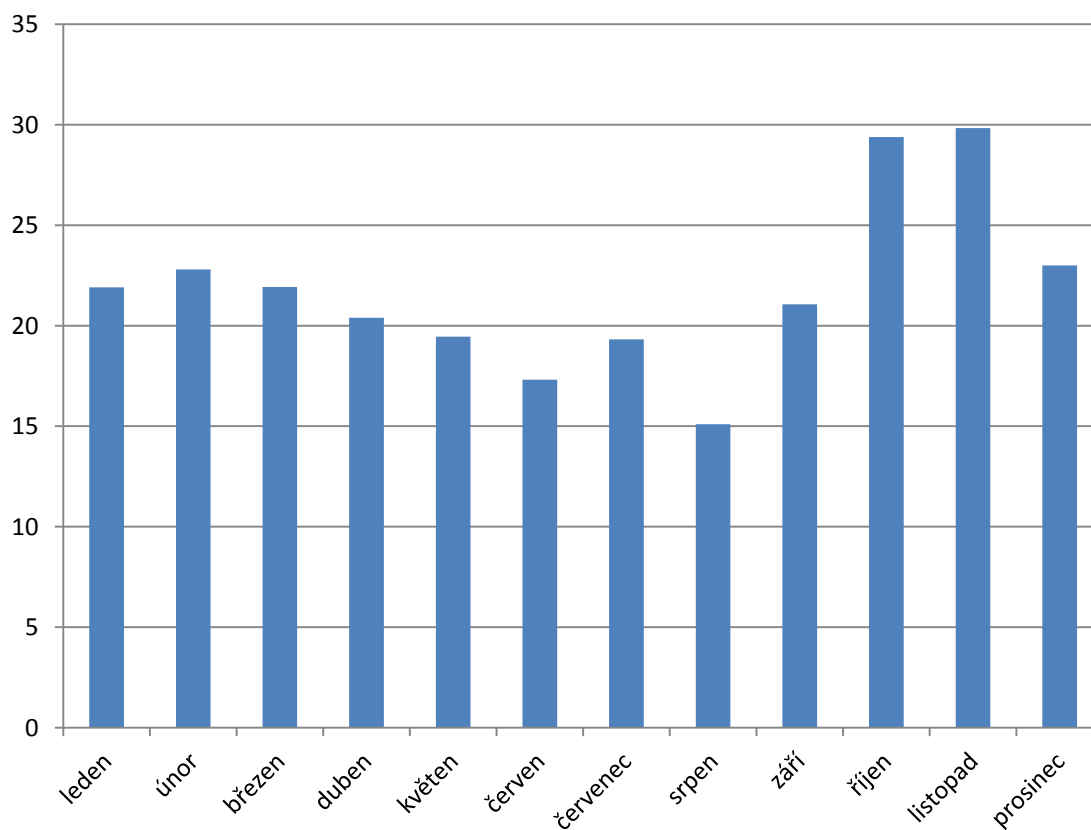
Tabulka 11.1. Spotřeba zemního plynu zájmového objektu v m<sup>3</sup>

## b) Elektrická energie

Spotřeba elektrické energie v kWh	
Leden	21 911
Únor	22 800
Březen	21 922
Duben	20 396
Květen	19 453
Červen	17 314
Červenec	19 322
Srpen	15 100
Září	21 063
Říjen	29 381
Listopad	29 827
Prosinec	23 000
<b>Celkem</b>	<b>261 489</b>

Tabulka 11.2. Spotřeba elektrické energie zájmového objektu v kWh

Na následujícím obrázku jsou spotřeby v jednotlivých měsících vyobrazeny ve sloupcovém grafu.



Obr. 11.1. Graf spotřeby elektrické energie po měsících v kWh

## 11.2. Stanovení ročního průběhu spotřeby tepla

U takto malých spotřebitelů tepla je obtížné získat přesná data o výrobě tepla. Obvykle nemají data spotřebovaného tepla po hodinách ani dnech, mají pouze měsíční faktury za zemní plyn. Množství vyrobeného tepla je tedy nutné dopočítat pomocí spotřeby zemního plynu v m<sup>3</sup> přes spalné teplo zemního plynu Q<sub>n</sub> a účinnost stávajícího kotle μ<sub>k</sub>.

### Výpočet vyrobeného tepla v objektu:

$$\text{m}^3 * Q_n * \mu_k = \text{kWh}$$

Příklad výpočtu pro měsíc leden:

$$5\,170 * 10,6607 * 0,9 = 47\,400 \text{ kWh}$$

Množství vyrobeného tepla v kWh	
Leden	47 400
Únor	36 100
Březen	31 600
Duben	12 000
Květen	1 300
Červen	1 200
Červenec	850
Srpen	780
Září	1 160
Říjen	2 780
Listopad	16 890
Prosinec	27 500
<b>Celkem</b>	<b>179 560</b>

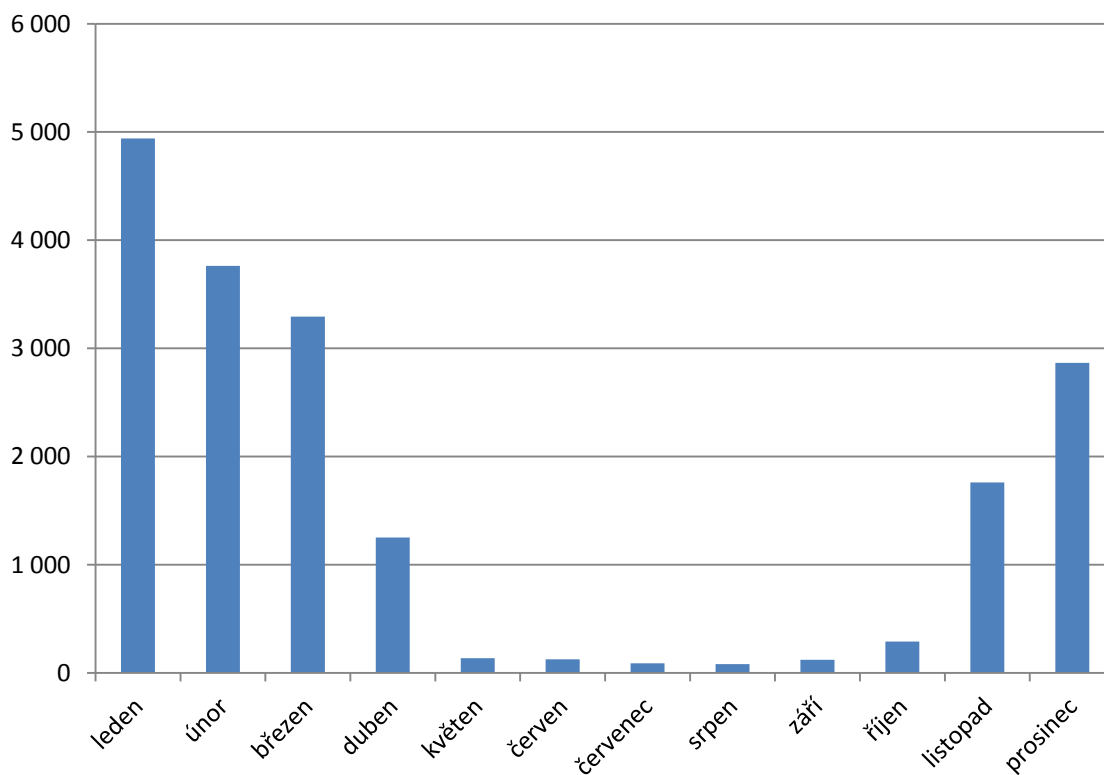
Tabulka 11.3. Množství vyrobeného tepla v kWh

Základní jednotka tepla jsou Joule. Množství vyrobeného tepla v kWh tedy přepočítám na GJ, jak je zvykem množství vyrobeného tepla uvádět.

<b>Množství vyrobeného tepla v GJ</b>	
Leden	170,64
Únor	129,96
Březen	113,76
Duben	43,20
Květen	4,68
Červen	4,32
Červenec	3,06
Srpen	2,81
Září	4,18
Říjen	10,01
Listopad	60,80
Prosinec	99,00
<b>Celkem</b>	<b>646,42</b>

Tabulka 11.4. Množství vyrobeného tepla v GJ

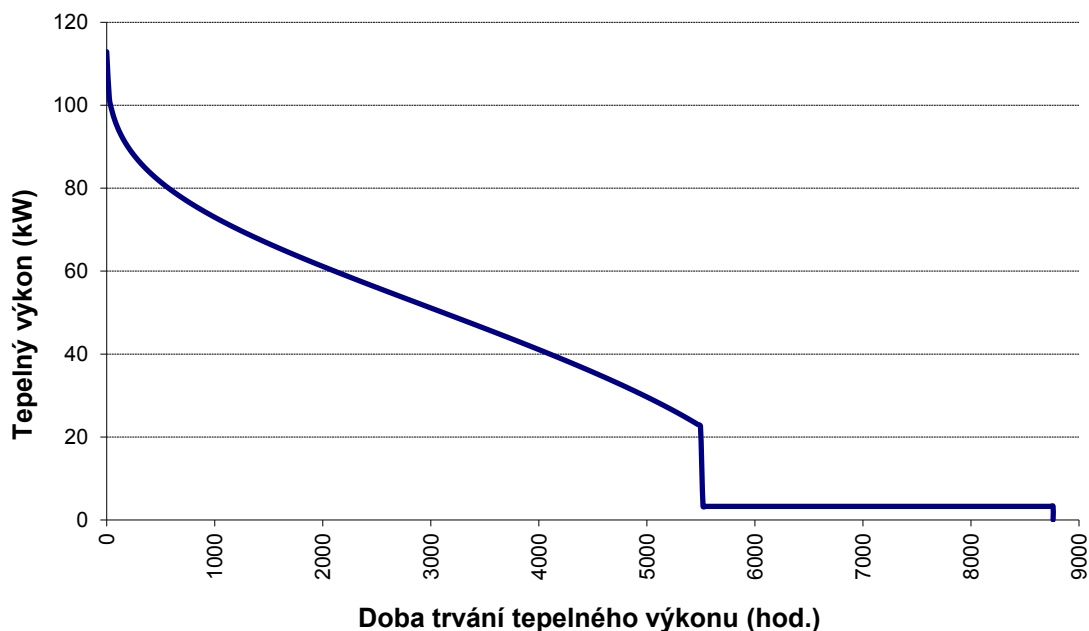
Z předchozí tabulky jsem vytvořil sloupcový graf, data jsou seřazena po měsících.



Obr. 11.2. Roční průběh spotřeby tepla objektu v GJ



Následně jsem pomocí softwaru vytvořil graf hodinových maxim. Tento přepočít je nepřesný. Uvažuje, že spotřeba TUV je konstantní a tvoří 20 % objemu spotřebovaného tepla. Data za měsíc se vydělí počty dnů v měsíci a dny se vydělí hodinami, následně se vzniklé výkony seřadil od největšího po nejmenší. Křivka je tvořena dle normy pro vytápění, počítá s denostupni.



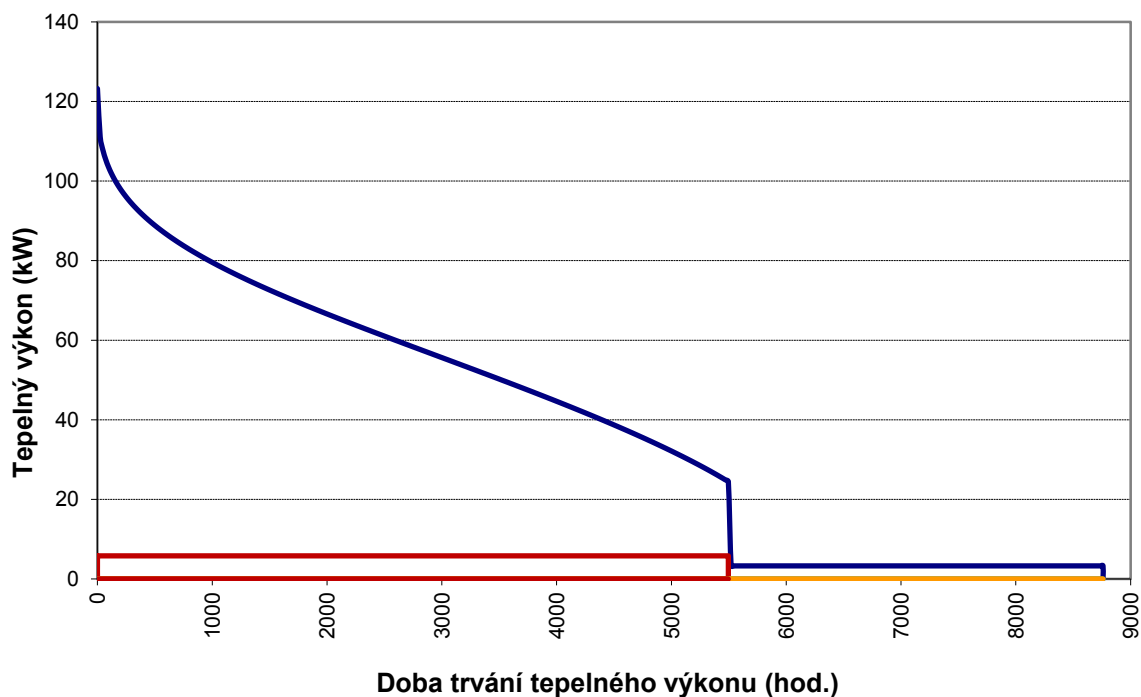
Obr. 11.3. Roční průběh spotřeby tepla objektu

### 11.3. Návrh implementace solárního nízkoteplotního SM

Výkon konceptu implementace solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru nepřevyšuje potřebu tepla ani elektřiny zájmového objektu. Je tedy nutné použít stávající zdroj tepla s tím, že křivka ročního průběhu spotřeby tepla bude doplněna o tepelný výkon jednotky Stirlingova motoru. Spotřeba elektrické energie zájmového objektu výrazně převyšuje výkon jednotky Stirlingova motoru, za žádných okolností tedy nedojde k přetoku do distribuční soustavy. Koncept je navíc vybaven bateriovým systémem. V případě, že budou baterie plně nabitě a nebude dostatečný odběr elektřiny a to ani při minimálním zdvihu přemísťovacího pístu, řídicí systém zastaví přívod teplotního média a jednotka Stirlingova motoru se zastaví.

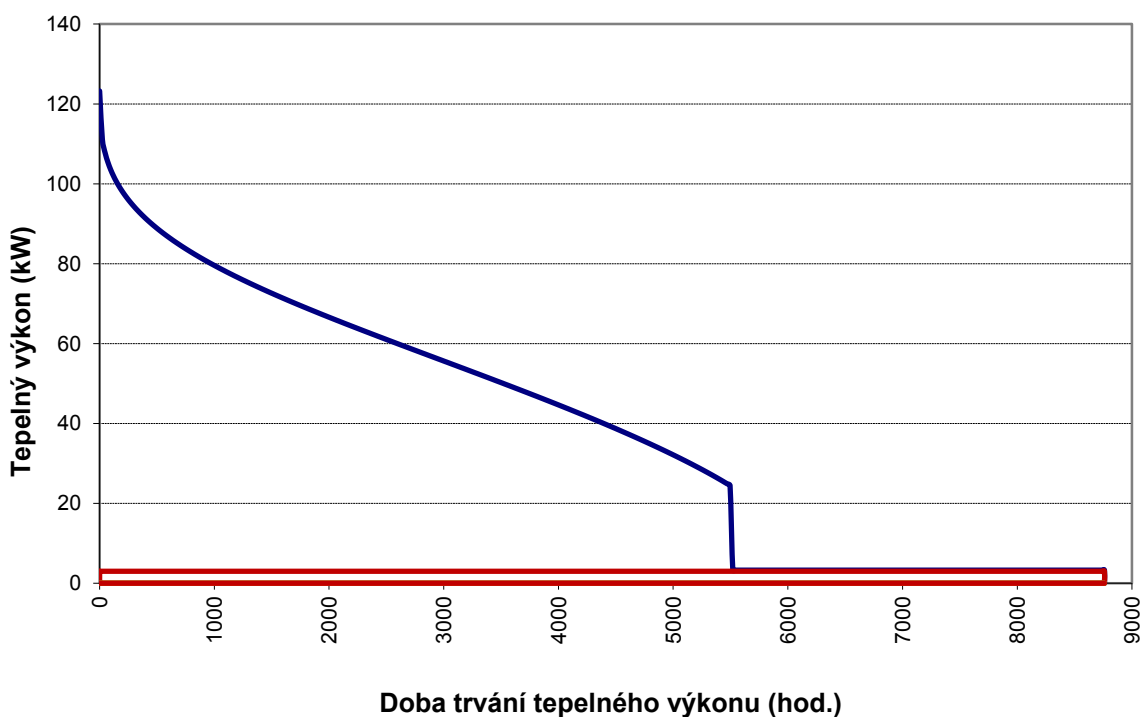
Do ročního průběhu spotřeby tepla zájmového objektu jsem provedl návrh implementace solárního nízkoteplotního Stirlingova motoru.

Stanovil jsem, že v případě varianty zásobování objektu teplem – viz bod 11.5.2, budu z ochlazeného teplotního média odebírat maximálně 30 °C. Tento teplotní gradient odpovídá tepelnému výkonu 5,8 kWh. Vzhledem k velikosti akumulární nádoby by bylo možné odebírat tento výkon pouze po dobu 2,7 hodin. Z tohoto důvodu, budu raději z teplotního média odebírat menší výkon, ale po delší čas.



Obr. 11.4. Návrh implementace solárního nízkoteplotního SM s maximálním odběrem

Z následujícího grafu vyplývá, že pokud budu ze systému odebírat 3 kWh, pokryl bych téměř celou spotřebu TUV. Snížením odebíraného výkonu z ochlazeného teplotního média se odběr výkonu prodlouží na 5,2 hodiny. Koncept je navržen primárně pro výrobu elektrické energie, tento systém bude tedy využíván pouze v případě, že nebude dostatečná intenzita slunečního záření a teplotní médium se neohřeje na požadovanou teplotu.



Obr. 11.5. Návrh implementace solárního nízkoteplotního SM s odběrem 3 kWh

#### **10.1.1 Solární kolektory**

Rozhodoval jsem se mezi žlabovým sběračem a vakuovým trubicovým kolektorem. Žlabový sběrač dokáže ohřát teplotnosné médium na mnohem vyšší teplotu než vakuový trubicový kolektor, ale tak vysoká teplota není v konceptu potřeba. Zvolené teplotnosné médium je možné ohřát maximálně na 350 °C. V systému počítám s teplotou 200 °C. Také z předcházejících výpočtů a konstrukčních důvodů vyplývá, že vhodnější bude použít vakuové trubicové kolektory. Žlabový sběrač je navíc velmi drahý.

Teplotnosné médium je potřeba chránit před přehřátím. Tato ochrana bude probíhat v solárních kolektorech. V případě, že řídicí systém zaznamená, že dochází k přehřívání média, dojde ke změně úhlu natočení kolektorů tak, aby intenzita dopadajících paprsků nebyla tak silná. Dalším ochranným prvkem proti přehřátí teplotnosného média může být odběr tepla z teplotnosného média pro TV a TUV.

#### **10.1.2 Akumulační zásobník na horký olej**

Prozkoumal jsem nabídku akumulčních zásobníků. Na trhu jsem nenašel zásobník, který by vyhovoval požadavkům tohoto konceptu. Navrhl jsem tedy vlastní zásobník. Objem zásobníku je 980 l. Výkres zásobníku je v příloze C.

#### **10.1.3 Akumulační zásobník na ochlazený olej**

Akumulační zásobník na ochlazený olej bude stejný jako akumulční zásobník na horký olej, navíc bude doplněn o tepelný výměník z hladkých trubek. Výkres zásobníku je v příloze D.

#### **10.1.4 Čerpadla**

Obě čerpadla musí být schopna čerpat teplotnosné médium o teplotě okolo 200 °C. Pro tento účel se nejlépe hodí zubové čerpadlo. Toto čerpadlo je jednoduché a spolehlivé, to velmi dobře zapadá do celého konceptu.

#### **10.1.5 Bateriové systémy**

Koncept počítá s využitím vysokokapacitních akumulátorů elektrické energie. Jedná se o baterie určené pro objekty, které velikostí a spotřebou elektrické energie spadají do mého konceptu. Slouží pro uchovávání elektřiny vyrobené z různých zdrojů. Elektrická energie se spotřebovává v době, kdy není dostupná nebo, kdy je v distribuční soustavě drahá. Tento systém je také velmi zajímavý v případě výpadu elektrické energie, jedná se o záložní zdroj. Jsou to automatizované, kompaktní systémy, jednoduché na instalaci. Na současném trhu jsou zajímavé technologie:

- **POWERWALL:** Jedná se o akumulátory Americké společnosti TESLA MOTORS. Tato společnost vyrábí akumulátory o kapacitě 7 kWh a 10 kWh. Výhodou akumulátoru je, že je možné spojit tyto baterie do větších celků až do velikosti 90 kWh. Tyto systémy jsou cenově velmi dostupné.
- **SONNENBATTERIE:** Jedná se o systém Německé společnosti, používá akumulátory Japonské společnosti SONY. Nabízí akumulátory o kapacitách: 1,2 kWh; 4,8 kWh; 6,0 kWh; 7,2 kWh. Tento systém je možné dále rozšiřovat do větších celků.



Obr. 11.6. Baterie Powerwall společnosti TESLA MOTORS [54]

Tyto bateriové systémy uchovávají stejnosměrný proud. Výstupem mého konceptu je střídavý proud. V případě akumulování elektřiny do bateriových systémů je nutné použít měnič střídavého proudu na stejnosměrný.

#### 10.1.6 Alternátor

Aby bylo možné používat koncept také při výpadku elektrické energie, využiji pro účely tohoto konceptu synchronní generátor elektrické energie. Bude tak možné používat koncept jako záložní zdroj (ostrovní režim) viz bod 11.5.1 a) Varianta zásobování elektřinou.

### 11.4. Porovnání konceptu s kogenerační jednotkou

Po důkladném prozkoumání trhu kogenerací a mikrokogenerací na zemní plyn jsem se rozhodl pro porovnání mého konceptu s mikrokogenerační jednotkou XRGI® 6 od výrobce EC POWER. Tuto KGJ jsem zvolil zejména proto, že je výkonově nejbližší výkonu mého konceptu. Jiné KGJ mají obvykle podstatně větší výkony a těžko by se s mým konceptem srovnávaly. Tato mikrokogenerační jednotka má elektrický výkon (modulovatelný) 2,5 - 6 kW<sub>e</sub> a tepelný výkon (modulovatelný) 8 - 13,5 kW<sub>t</sub>.

Mezi největší výhody mého konceptu považuji, že „palivo“ je v mém případě zdarma. Další obrovskou výhodou je také použitá motorová jednotka. Stirlingův motor má oproti spalovacímu motoru výhodu v menším počtu pohybujících se částí, má tak výrazně jednodušší konstrukci, díky tomu má vyšší životnost a je téměř bezporuchový,

nemá žádné ventily. Tím, že není přetlakovaný není problém ani s drobnými netěsnostmi - co unikne se opět nasaje. Stirlingův motor nepotřebuje komín, protože nic nespaluje, má tedy nulové emise. Další výhodou vidím v konstrukci celého Stirlingova motoru tak, aby ho bylo možné vyrobit v lépe vybavené domácí dílně. Vyrobit kogenerační jednotku v domácích podmínkách by bylo velmi obtížné.

Nevýhodou mého konceptu je závislost na slunečním záření. Další nevýhodou je z pohledu bezpečnosti přítomnost horkého teplotního média. Problémem je také potřeba drahých solárních kolektorů.

Jednoznačná výhoda použití mikrokogenerační jednotky je nezávislost na počasí. Zemní plyn je k dispozici neustále, ale musí se za něj na rozdíl od slunečního záření platit. Další výhodou je, že jednotku koupím již hotovou, nemusím nic vyrábět, stačí ji pouze připojit. Pokud si vyberu ověřeného výrobce, mám profesionální stroj. U KGJ mohou být zajímavé tzv. zelené bonusy za vysokoúčinnou výrobu elektřiny a tepla. Nevýhodou je vysoká cena mikrokogeneračních jednotek. U malých strojů je obvykle náročný také jejich servis. Jedná se o spalovací motor, takže se musí vyměňovat olej a další provozní kapaliny. KGJ je složité zařízení, skládá se ze spalovacího motoru, generátoru, mnoha výměníků, provozních kapalin, atd.

#### **Technická data jednotky Stirlingova motoru:**

- Viz bod. 10.6 Základní specifikace motoru

#### **Technická data KGJ:**

- |   |  |
|---|--|
| • Max. hladina hluku:                             | 49 dB(A).                              |
| • Rozměry v mm:                                   | (h × š × v): 920 × 640 × 960.          |
| • Hmotnost:                                       | 440 kg.                                |
| • Servisní interval:                              | 10.000 hodin.                          |
| • Palivo:   | zemní plyn.                            |
| • Elektrický výkon (modulovaný):                  | 2,5 - 6 kW.                            |
| • Tepelný výkon (modulovaný):                     | 8 - 13,5 kW.                           |
| • Elektrická účinnost:                            | 29,5 %.                                |
| • Tepelná účinnost (bez rekuperace spalin):       | 63,5 %.                                |
| • Celková účinnost (bez rekuperace spalin):       | 93 %.                                  |
| • Výstupní teplota topné vody (konstantní):       | 80 - 85 °C.                            |
| • Teplota vratné vody (variabilní):               | 5 - 75 °C.                             |
| • Maximální teplota spalin:                       | 100 °C.                                |
| • Emise CO:                                       | < 12 mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> .  |
| • Emise NO <sub>x</sub> :                         | < 199 mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> . |
| • ÚPE v % (úspora primární energie dle DIN-4709): | 25,8 %.                                |

### Srovnání konceptu s kogenerační jednotkou:

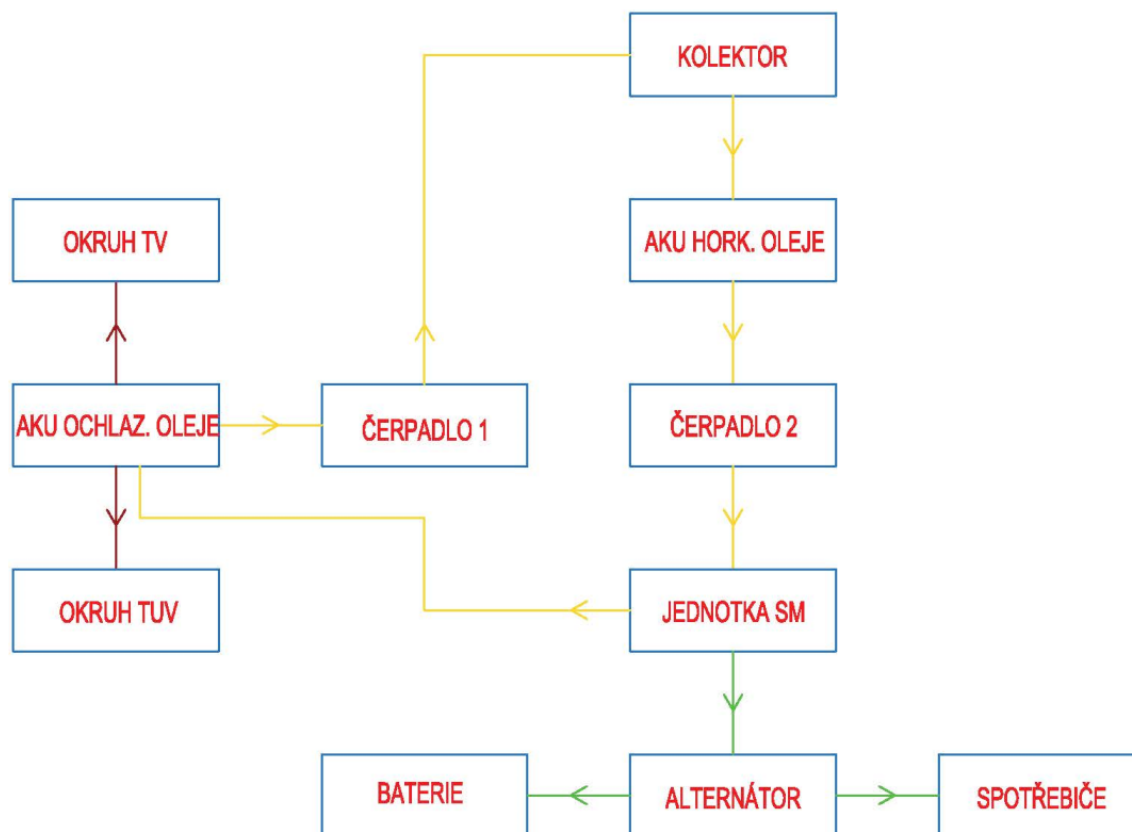
Veličina	Jednotka SM*	Kogenerační jednotka
Hluk	25 dB(A)	49 dB(A)
Rozměry	1200 × 1200 × 1150	920 × 640 × 960
Palivo	-	zemní plyn
Elektrický výkon	1,88 – 3,86 kW	2,5 - 6 kW
Tepelný výkon	0 - 5,8 kW	8 - 13,5 kW
Výstupní teplota topné vody	10 - 95 °C	80 - 85 °C
Teplota vratné vody	5 - 95 °C	5 - 75 °C
Maximální teplota spalin	-	100 °C
Emise CO:	-	< 12 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Emise NO <sub>x</sub>	-	< 199 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>

\*) uvedené hodnoty jsou často teoretické nebo určeny kvalifikovaným odhadem

Tabulka 11.5. Srovnání konceptu s kogenerační jednotkou

### 11.5. Technologické schéma návrhu nízko-teplotního SM

Technologické schéma konceptu je blíže popsáno v bodě 11.5.1 „Varianta zásobování elektřinou“ a v bodě 11.5.2 „Varianta zásobování teplem“.



Obr. 11.7. Technologické schéma návrhu nízko-teplotního SM



#### **11.5.1. Varianta zásobování elektřinou**

Tato varianta bude vždy upřednostňována, protože elektrická energie je ušlechtilější a dražší než teplo.

V kolektorech se bude ohřívat olej. Horký olej se bude shromažďovat v akumulární nádobě. Ochlazený olej se bude shromažďovat v druhé akumulární nádobě s tepelným výměníkem z hladkých trubek. Koncept bude mít dva oběhy teplotnosného média. První čerpadlo bude dopravovat olej mezi akumulární nádrží s ochlazeným olejem, kolektorem a akumulární nádrží s horkým olejem. V druhém oběhu bude čerpadlo č. 2 dopravovat horký olej na ohřívanou část Stirlingova motoru a zpět do akumulární nádrže s ochlazeným olejem.

Setrvačnický Stirlingův motor bude spojen pomocí převodovky se synchronním generátorem, který bude transformovat mechanickou na elektrickou energii. Elektřina se bude přímo spotřebovávat ve spotřebičích nebo se bude akumulovat v bateriích. Řídicí systém bude zajišťovat, aby se nejprve nabil akumulátor elektřiny. Baterii bude možné využít jako záložní zdroj. Baterie pokryje vlastní spotřebu konceptu a jednotka Stirlingova motoru může dále vyrábět elektrickou energii, jednalo by se tak o ostrovní režim. V případě, že budou baterie plně nabité a nebude dostatečný odběr elektřiny a to ani při minimálním zdvihu přemísťovacího pístu, řídicí systém zastaví přívod teplotnosného média a jednotka Stirlingova motoru se zastaví.

Celý systém bude osazen řídicí jednotkou a čidly zajišťující plynulý chod a bezpečnost systému.

#### **11.5.2. Varianta zásobování teplem**

V konceptu je také uvažováno se zásobováním objektu tepelnou energií. To v případě, že se teplotnosné médium ochladí při transformaci na elektrickou energii a další den nebude intenzita slunečního záření taková, aby se olej opět ohřál na požadovanou teplotu. Energie v teplotnosném médiu bude sloužit k přípravě teplé užitkové vody a topné vody. Teplo pro TUV a TV se bude odebírat přes tepelný výměník z hladkých trubek umístěný v akumulární nádobě s ochlazeným olejem a předávat do okruhu spotřebitele. Maximální tepelný výkon jednotky Stirlingova motoru je 5,8 kWh.

## 12. ZÁVĚR

V konceptu se jedná o solární nízkoteplotní atmosférický Stirlingův motor typu beta. Jako vnitřní médium používá jednotka SM vzduch. Teplotní rozdíl mezi ohřívanou a ochlazovanou částí je 170 °C. Teplonosné médium je olej. Zdvih přemísťovacího pístu je regulovatelný, aby bylo možné koncept využívat co nejefektivněji. Elektrický výkon je při minimálním zdvihu přemísťovacího pístu 1,88 kW<sub>e</sub>, při maximálním zdvihu přemísťovacího pístu je 3,86 kW<sub>e</sub>. Nedostatky elektrické energie budou pokrývány z distribuční soustavy.

Z požadovaného výkonu jsem zpětným dopočtem ze Schmidty teorie určil rozměry jednotky Stirlingova motoru, válec bude mít průměr 1 200 mm, pracovní píst bude mít průměr 1 200 mm, přemísťovací píst bude menší o vůli mezi válcem a pístem. Těmto rozměrům odpovídá setrvačnick o průměru 1 100 mm.

Solární energie se bude akumulovat v teplonosném médiu, které se bude shromažďovat v akumulacním zásobníku. Sluneční energie se bude předávat teplonosnému médiu pomocí vakuových trubicových kolektorů.

Ve chvíli, kdy bude potřeba elektrická energie, přivede se teplonosné médium na ohřívanou část jednotky SM, ta se roztočí. Synchronní generátor připojen na setrvačnick bude transformovat mechanickou energii na elektrickou, ta se bude spotřebovávat přímo ve spotřebičích nebo se bude akumulovat v bateriích. Aby bylo možné akumulovat elektřinu v bateriích je potřeba použít měnič střídavého proudu na stejnosměrný proud. Asynchronní generátor je zvolen z důvodu, aby bylo možné používat koncept také při výpadku elektrické energie, vlastní spotřeba systému bude pokrývána z baterií a jednotka Stirlingova motoru tak bude fungovat jako záložní zdroj (ostrovní režim).

V konceptu budou použity dva akumulacní zásobníky - na horký olej a ochlazený olej. Na jednotku SM se bude přivádět horký olej, ochlazený se bude shromažďovat v zásobníku ochlazeného oleje, ten se pak bude ohřívat v kolektoru. Oba akumulacní zásobníky mají objem 980 l. Akumulacní zásobník na ochlazený olej je doplněn o tepelný výměník z hladkých trubek. Při tomto objemu zásobníků dokáže při maximálním výkonu koncept dodávat elektřinu 2,7 hodiny, při minimálním výkonu 5,6 hodiny. Vždy bude upřednostňován režim dodávky elektrické energie. V případě, že se olej neohřeje na požadovanou teplotu, bude možné dodávat do objektu také teplo, při maximálním výkonu 5,8 kW<sub>t</sub> to bude 2,7 hodin, při optimálním výkonu 3 kW<sub>t</sub> to bude 5,2 hodin.

Koncept nízkoteplotního solárního Stirlingova motoru by bylo ideální implementovat v rovníkových oblastech a lokalitách vyobrazených na obrázku 7.1 „Vhodnost

světových lokalit pro solární a tepelné systémy“. Pro názornost jsem koncept implementoval v našich podmínkách, ale v tomto případě je nutno důkladně zvážit skutečnou realizaci. Zejména je potřeba zaměřit se na intenzitu a dobu slunečního záření, investiční náklady a s tím spojenou návratnost.

Jak už bylo popsáno dříve, celý koncept je tvořen tak, aby ho bylo možné vyrobit v lépe vybavené domácí dílně. V našich klimatických podmínkách se jedná spíše o podnět pro kutily a příznivce Stirlingova motoru, kterým nejde tolik o zisk a návratnost. V letním období očekávám, že by měl koncept fungovat bez problémů. V zimním období nejspíše nebude pracovat optimálně, z důvodu nižší intenzity slunečního záření. V našich klimatických podmínkách neočekávám, že by se koncept výrazně rozšířil. Pro kutily, kterým je blízká myšlenka více osamostatnit svůj dům od distribuční soustavy elektrické energie to může být zajímavá alternativa.

Mezi největší přínosy konceptu považuji možnost vyrábět elektrickou energii pouze, když je potřeba. Elektřinu je možné uchovávat v bateriích. Koncept je navržen tak, aby ho bylo možné používat také jako záložní zdroj, koncept tak bude fungovat v ostrovním režimu. Koncept umožňuje zásobovat objekt také tepelnou energií. Jednotka Stirlingova motoru je navržena tak, aby ji bylo možné vyrobit v lépe vybavené domácí dílně. Není vyžadována příliš přesná výroba, je možné použít běžné stroje a materiály. Stirlingův motor má minimum pohyblivých částí a jednoduchou konstrukci, tím je zajištěna dlouhá životnost a minimální poruchovost. Z ekologického hlediska je koncept zajímavý tím, že transformuje pouze solární energii, má tedy nulové emise.

### 13. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

#### Literatura:

- [1] MÍKA, Jiří. *Kogenerace s pístovými motory s vnitřním a vnějším spalováním: [Cogeneration with [i.e. with] piston internal and external engines] : teze habilitační práce ke jmenování docentem v oboru Energetické stroje a zařízení.* 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, 27 s. ISBN 80-248-0703-3.
- [2] JIŘÍ, MÍKA. *Teplovzdušné motory - motory budoucnosti.* Ostrava, 2013. Text vypracovaný v rámci projektu CZ.1.07/1.1.00/08.0010. VŠB–Technická univerzita Ostrava.
- [3] ORGAN, Allan J. a Foreword by T. FINKELSTEIN. *Thermodynamics and gas dynamics of the Stirling cycle machine.* [Digitally printed version 2010]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 05-211-3179-0.
- [4] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol.* 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 158 s. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [5] ŠKORPÍK, Jiří. *Příspěvek k návrhu Stirlingova motoru: A contribution of the Stirling engine.* Brno: VUT FSI, 2008, 30 s. ISBN 978-80-214-3763-0.
- [6] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy.* 1. vyd. Praha: Prometheus, c2003, 276 s. ISBN 80-719-6264-3.
- [7] KAMINSKÝ a VRTEK. VŠB-TU OSTRAVA. *OBNOVITELNÉ A ALTERNATIVNÍ ZDROJE ENERGIE: interní učební texty.* Ostrava, 2002.
- [8] SCHMIDT THEORY FOR STIRLING ENGINES. HIRATA, KOICHI. *SCHMIDT THEORY FOR STIRLING ENGINES* [online]. 1997 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/schmidt/schmidt.htm>
- [9] SENFT, James R. *An introduction to Stirling engines.* 4. printing. River Falls, Wis: Moriya Press, 1998. ISBN 978-096-5245-500.
- [10] ROY DARLINGTON, Keith Strong. *Miniature hot air engines.* Ramsbury: Crowood, 2005. ISBN 978-186-1266-880.
- [11] KYSELA Ladislav, MÍKA Jiří a KYSELOVÁ Sylva. *TEPLÁRENSTVÍ.* Ostrava, 2010. Učební text. VŠB–Technická univerzita Ostrava.
- [12] TEDOM [online]. Třebíč, 2016 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <https://www.tedom.cz>
- [13] Tzb-info [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz>
- [14] Cleanergy: Changing the future of energy [online]. Mongolsko, 2016 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <https://www.cleanergy.com>

### Tabulky:

- [15] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. 1. vyd. Praha: Prometheus, c2003, 276 s. ISBN 80-719-6264-3.

### Obrázky:

- [16] *Edit International - At Last, Good News* [online]. 2009 [cit. 2016-24-04]. Dostupné z: <http://www.editinternational.com/print.php?id=491ddd1e6b54d>
- [17] *Industrial Revolution* [online]. 2003 [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://education.datapeak.net/industrialrevolution.htm>
- [18] HELSING. *Beta stirling* [online]. 2007 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta stirling animation.gif](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta_stirling_animation.gif)
- [19] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [20] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [21] HELSING. *Beta stirling* [online]. 2007 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta stirling animation.gif](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta_stirling_animation.gif)
- [22] HELSING. *Beta stirling* [online]. 2007 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta stirling animation.gif](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta_stirling_animation.gif)
- [23] HELSING. *Beta stirling* [online]. 2007 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta stirling animation.gif](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta_stirling_animation.gif)
- [24] HELSING. *Beta stirling* [online]. 2007 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta stirling animation.gif](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3ABeta_stirling_animation.gif)
- [25] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [26] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [27] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [28] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2011 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>

- [29] WHEELER, Richard. *Alpha Stirling* [online]. 2007 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3AAlpha Stirling.gif](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor%3AAlpha_Stirling.gif)
- [30] WHEELER, Richard. *Beta Stirling* [online]. 2007 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Stirling%C5%AFv motor#mediaviewer/Soubor:Beta Stirling frame 16.png](http://cs.wikipedia.org/wiki/Stirling%C5%AFv_motor#mediaviewer/Soubor:Beta_Stirling_frame_16.png)
- [31] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [32] *Upraveno autorem z:*  
*Solar power from the desert rather than desert in Germany: renewable energy in a trans-European context* [online]. 2007 [cit. 2016-10-02]. Dostupné z: [http://www.solarserver.com/solarmagazin/solar-report\\_0207\\_e.html](http://www.solarserver.com/solarmagazin/solar-report_0207_e.html)
- [33] *Upraveno autorem z:*  
*Solar power from the desert rather than desert in Germany: renewable energy in a trans-European context* [online]. 2007 [cit. 2016-10-02]. Dostupné z: [http://www.solarserver.com/solarmagazin/solar-report\\_0207\\_e.html](http://www.solarserver.com/solarmagazin/solar-report_0207_e.html)
- [34] *Upraveno autorem z:*  
*Tessera Solar | North America | Power From Stirling Energy Systems* [online]. 2010 [cit. 2016-11-02]. Dostupné z: <http://www.graphique-us.com/clients/Tessera/north-america/>
- [35] *SunCatcher Solar Thermal Technology : Susty* [online]. 2006 [cit. 2016-20-02]. Dostupné z: <http://susty.com/suncatcher-solar-thermal-technology-stirling-energy-systems/>
- [36] *Huge Solar Plants With Stirling Engines* [online]. 2005 [cit. 2016-22-02]. Dostupné z: <http://www.treehugger.com/renewable-energy/huge-solar-plants-with-stirling-engines.html>
- [37] *Solar Thermal Energy* [online]. 2006 [cit. 2016-22-02]. Dostupné z: <http://nared.org/solar-energy/solar-thermal-energy/>
- [38] *Concentrating Solar Power* [online]. 2009 [cit. 2016-22-02]. Dostupné z: <http://www.seia.org/policy/solar-technology/concentrating-solar-power>
- [39] *The SunCatcher: Concentrating Solar Dishes Set Efficiency Record* [online]. 2009 [cit. 2016-22-02]. Dostupné z: <http://inhabitat.com/the-suncatcher-solar-power-comes-into-focus/>
- [40] *Upraveno autorem z:*  
*SunCatcher Solar Thermal Technology* [online]. 2006 [cit. 2016-16-03]. Dostupné z: <http://susty.com/suncatcher-solar-thermal-technology-stirling-energy-systems/>



- [41] *Upraveno autorem z:*  
*SunCatcher Solar Thermal Technology* [online]. 2006 [cit. 2016-16-03]. Dostupné z: <http://sustty.com/suncatcher-solar-thermal-technology-stirling-energy-systems/>
- [42] STIRLING CHP SYSTEMS. *A turnkey CHP System* [online]. Mongolsko, 2016 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://cleanenergy.com/solutions/#chp-systems>
- [43] *Stirlingův motor* [online]. 2012 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/>
- [44] *Stirlingův motor* [online]. 2012 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/>
- [45] *Hot Air Stirling Engine Motor Generator Education Toy Kits Electricity M16-V4-D* [online]. 2014 [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.ebay.com/itm/Hot-Air-Stirling-Engine-Motor-Generator-Education-Toy-Kits-Electricity-M16-V4-D-/310707249855?pt=Model Kit US&hash=item48579862bf>
- [46] *Ministeam Boehm Stirling Technik HB28* [online]. 2008 [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: [http://www.ministeam.com/acatalog/info\\_BOHB28.html](http://www.ministeam.com/acatalog/info_BOHB28.html)
- [47] *Solar-Stirlingmotor - Ausführung "Solar Edelstahl"* [online]. 2014 [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: [http://www.ltd-stirling.eu/shop/article\\_5/Solar-Stirlingmotor--Ausf%C3%BChrung-%22Solar-Edelstahl%22.html?sessid=slLEGToJvv5oL6dWD1x2BT0jyWSjQzxd3X41p8IDOyCaYgMNUeg82ekpiftyugd1&shop\\_param=cid%3D4%26aid%3D5%26](http://www.ltd-stirling.eu/shop/article_5/Solar-Stirlingmotor--Ausf%C3%BChrung-%22Solar-Edelstahl%22.html?sessid=slLEGToJvv5oL6dWD1x2BT0jyWSjQzxd3X41p8IDOyCaYgMNUeg82ekpiftyugd1&shop_param=cid%3D4%26aid%3D5%26)
- [48] *MM-7 Stirling Engine* [online]. 2014 [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:MM-7\\_Stirling\\_Engine.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:MM-7_Stirling_Engine.jpg)
- [49] *Stirlingův motor - Princip* [online]. 2010 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://stirlingmotor.cz/princip.html>
- [50] *Vakuový trubicový kolektor - 24 trubic* [online]. 2013 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.obchodsolar.cz/obchodsolar/eshop/8-1-Solarni-kolektory/0/5/87-Vakuovy-trubicovy-kolektor-24-trubic>
- [51] *BAX-SOLAR-T vakuové trubicové sluneční kolektory* [online]. 2013 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: [http://www.barxenergy.cz/bax\\_solar\\_t/](http://www.barxenergy.cz/bax_solar_t/)
- [52] *SOLÁRNÍ ENERGIE* [online]. 2006 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k23.htm>
- [53] *Solarthermische Kraftwerke: Technologie-Transfer in den "Sonnengürtel"* [online]. 2003 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.solarserver.de/solarmagazin/artikelmai2003.html>
- [54] Powerwall. *Energy Storage for a Sustainable Home* [online]. USA, 2016 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <https://www.teslamotors.com/powerwall>

## **14. SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha A: Jednotka SM - nárys

Příloha B: Jednotka SM - bokorys

Příloha C: AKU na horký olej

Příloha D: AKU na ochlazený olej

Příloha E: Technologické schéma

Příloha F: Technický list - Vakuový trubicový kolektor

Příloha G: Technický list - Žlabový sběrač

Příloha H: Technický list - Teplonosné médium